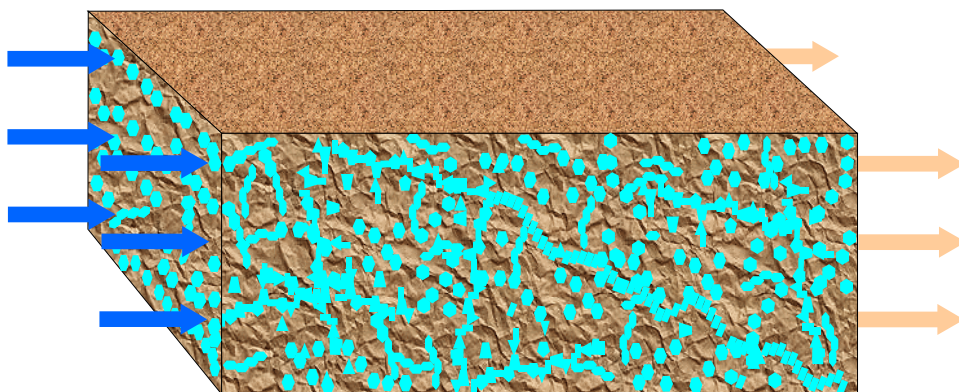


LowEx-Verbundforschung

Luftdurchströmter Schotterspeicher



Wärmetechnisches Simulationsmodell

BMWA – Verbundvorhaben LowEx

2007

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkung	4
2	Realbeispiel als Grundlage spezieller Betrachtungen	5
3	Geometrisches Simulationsmodell und maximale Zeitschrittweite	5
3.1	Approximierte Partikelform und Partikelkenndaten	5
3.2	Approximierte Partikelgitter	9
	• Symmetrieebenen im Partikelquader parallel zu den Oberflächen	10
	• Spiegelebene innerhalb des Partikelsimulationsgebietes	11
	• Automatische Festlegung der Partikelgitter	11
	• Stabilitätskriterium für die numerische Berechnung der Wärmeleitung im Partikel	12
	• Endgültige Fixierung des Partikelgitters	13
	• Zeitschrittweite für die Simulation des Partikelgemisches	13
	• Beispiel	13
3.3	Idealisierte Speichermodellierung	15
4	Wärmetechnische Randbedingungen - Zeitverläufe	16
5	Thermodynamische Modellierung	22
5.1	Instationäre Wärmeleitung zwischen den Volumenelementen	24
5.2	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Partikel und umströmender Luft	27
5.3	Stoffgrößen für feuchte Luft	28
5.4	Zustandsgrößen für feuchte Luft	30
5.5	Änderung des Luftzustandes beim Durchströmen des Speichers	33
5.6	Sonderfestlegungen bei Stillsand der Luftdurchströmung	35
5.7	Definition der Betriebsstunde	35
6	Grobablauf der Rechenorganisation	36
7	Anwenderinformation	38
7.1	Datenverwaltung	38
7.2	Eingabe der Speicherdaten	39
7.3	Eingabe der Zeitverläufe	44
7.4	Steuerung der Abarbeitungsvarianten	47
7.5	Programmgrundlagen, Installation und Abarbeitung	48
7.6	Ausgaben	50
8	Detailüberprüfung des Algorithmus "Berechnung_Instat"	53
8.1	Zusammenstellung der Elementdaten	53
8.2	Füllen der Starttemperatur	53

8.3	Ermittlung der Zeiten bei Beginn der Zeitschleife	54
8.4	Ermittlung des Lufteintrittszustandes	55
8.5	Ermittlung des Speicherzustandes zu Beginn der Simulation	57
8.6	Ermittlung der Stoffwerte für die feuchte Luft	57
8.7	Überprüfung des Wärmeübergangskoeffizienten	57
8.8	Überprüfung der Wärmetransportvorgänge am und im Partikel	57
8.9	Überprüfung des Wärmetransports durch den Luftstrom	60
8.10	Überprüfung der Bilanzbildungen	63
8.11	Zusammenstellung der Speicherwerte	64
8.12	Zustand der Speicherabschnitte	65
8.13	Bearbeitung der Temperaturfelder	66
9	Komplettbeispiele	67
9.1	Beispiel (Basisbeispiel)	67
9.2	Beispiel 2 (Entgegengesetzte Durchströmung)	78
9.3	Beispiel 3 (Wechselnde Durchströmung und Stillstand)	80
9.4	Beispiel 4 (Reduzierter Volumenstrom)	89
9.5	Beispiel 5 (Starttemperatur gemäß Datei)	90
10	Diskretisierungseinflüsse auf das Simulationsergebnis	92
11	Unsicherheiten bei der Simulation	96
12	Hauptanwendungsgebiete für das Simulationsmodell	99
	Literatur	109
Anhang (Listing für Simulationsprogramm)		94 Seiten

1 Vorbemerkung

Die wärmetechnische Simulation von luftdurchströmten Schotterspeichern stellt ein sehr komplexes Thema dar, dass auch bei sorgfältiger Untersuchung teilweise spekulative Züge trägt. Einige [Imponderabilien resultieren direkt aus dem Untersuchungsgegenstand](#) und seien nachfolgend genannt:

- Partikelgrößen und die Häufigkeit ihres Vorkommens
- Partikelform
- Verhältnis von Oberfläche zu Volumen der Einzelpartikel
- Materialkenndaten
- Größe und Gleichmäßigkeit der Hohlräume
- Art und Wirkung der Luftvertei- und Luftsammeleinrichtung
- Intensität und Gleichmäßigkeit der Luftdurchströmung usw.

Zu diesen natürlichen und technisch gegebenen Unsicherheiten kommen noch die [modellbedingten Vereinfachungen und die zu treffenden Annahmen bei der Simulation](#). Diese werden auszugsweise genannt:

- Auswahl repräsentativer Partikel und ihre Häufigkeitszuordnung
- Ähnlichkeit der Partikelgeometrie
- Vorgabe des Hohlraumanteils
- äquivalenter, einheitlicher Partikeldurchmesser
- Oberflächen-Volumen-Korrelation
- gleiche Luftgeschwindigkeit durch alle Hohlräume
- Approximation der Partikel bezüglich Form und ihre Unterteilung in Volumenelemente sowie die Gestaltung der geometrischen Gitter
- abschnittsweise Unterteilung des Speichers in Strömungsrichtung der Luft
- Wahl der Zeitschrittweite
- stark vereinfachte Annahme der Randbedingungen usw.

Die vorgestellte Schilderung der Gegebenheiten zeigt, dass ein Simulationsmodell nur der [Versuch einer annähernd realistischen Beschreibung des Speichers und seiner Dynamik](#) sein kann, dass das Modell der Verifizierung anhand realer Messergebnisse bedarf und dass dieses gegebenenfalls verbessert an die Wirklichkeit anzupassen ist.

Der grundsätzliche Aufbau des Simulationsmodells erfolgt in Anlehnung des in [1] vorgestellten Modells für "Wärmespeicher als mediendurchströmter Festkörper".

2 Realbeispiel als Grundlage spezieller Betrachtungen

Bei den Erläuterungen zum Simulationsmodell ist es mitunter hilfreich, auf ein Beispiel zu verweisen. Deshalb wird im Weiteren auf den derzeit aktuellen "Schotterspeicher Altgeringswalde" Bezug genommen. Die am 10.9.2007 übergebenen Daten sind anschließend wiedergegeben. Es wird hierbei bereits die Form des Rechnerausdruckes für die aufbereiteten Eingabedaten verwendet (Tabelle 2.1). Generell werde von maximal $p = 10$ Partikeltypen (Größen) ausgegangen.

Tabelle 2.1 Eingabedaten

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\TEST1\

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung Speicherabmessungen und Luftvolumenstrom:

Höhe m	Breite m	Länge m	Luftvolumenstrom m ³ /h
2,500	10,000	6,500	30000,0

Daten des Speichermaterials:

Rho kg/m ³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Hohlraumanteil %	Äquivalenter Durchmesser mm
2754,0	2,300	850,000	44,0	70,66

Schottervolumen m ³	Schottermasse kg	Luftvolumen m ³
91,00	250614,000	71,50

Partikeldaten:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Partikelvolumina in cm ³									
18,00	87,00	110,00	154,00	221,00	322,00	449,00	606,00	1150,00	0,00
Partikelanteile in %									
4,10	6,50	11,10	13,80	25,80	21,20	9,90	5,60	2,00	0,00

3 Geometrisches Simulationsmodell und maximale Zeitschrittweite

3.1 Approximierte Partikelform und Partikelkenndaten

In [2] wurden geometrisch unterschiedliche, mathematisch gut beschreibbare Regelkörper zur Nachbildung der Partikel vorgeschlagen.

Untersucht werden die in Tabelle 3.1 fixierten Körperformen.

Tabelle 3.1 Volumina V_K und Oberflächen O_K verschiedener Körperformen

Kugel mit Radius r	$O_K = 4 \pi r^2$	$V_K = 1,333 \pi r^3$	$O_K / V_K = 3 / r = 6 / d$
Zylinder mit Höhe $h = 3 r$	$O_K = 2 \pi r^2 + 6 \pi r^2 = 8 \pi r^2$	$V_K = 3 \pi r^3$	$O_K / V_K = 2,67 / r$
Würfel mit Kantenlänge a	$O_K = 6 a^2$	$V_K = a^3$	$O_K / V_K = 6 / a$
Pyramide mit quadratischer Grundfläche a^2 und $h = 3 a$	$O_K = a^2 + 6,08 a^2 = 7,08 a^2$	$V_K = a^3$	$O_K / V_K = 7,08 / a$
Konglomerat: 6 Pyramiden auf Würfel mit der Kantenlänge a und $h = a$	$O_K = 13,42 a^2$	$V_K = a^3 + 2 a^3 = 3 a^3$	$O_K / V_K = 4,47 / a$

Unter Annahme unterschiedlicher Körpervolumina sind in den Bildern 3.1 und 3.2 die charakteristischen Abmessungen r bzw. a sowie die Verhältnisse O_K / V_K gezeigt.

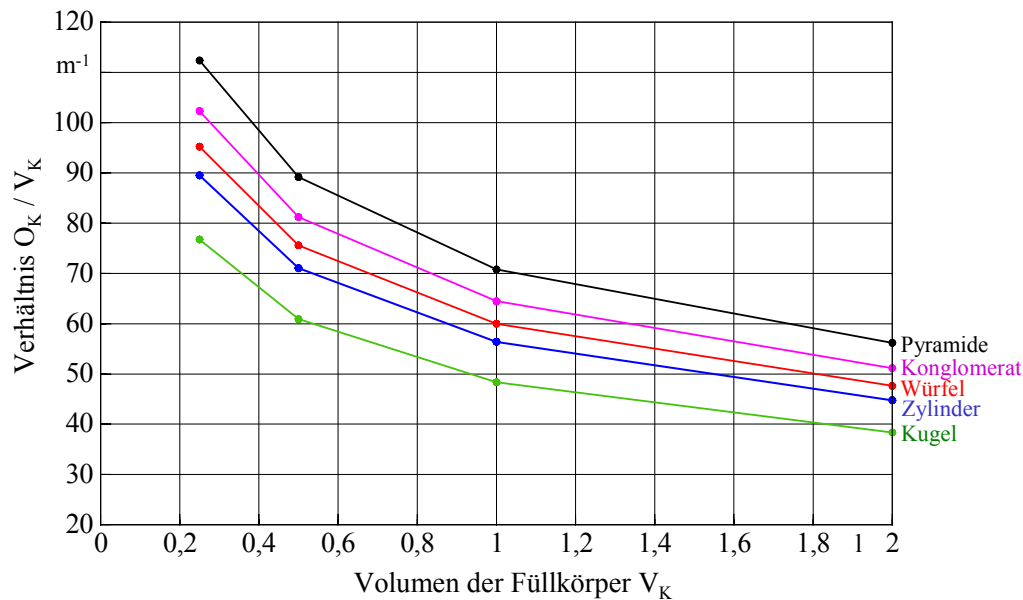


Bild 3.1 Verhältnis O_K / V_K in Abhängigkeit des Körpervolumens (Achsen linear geteilt, Abszissenmaßstab in Liter)

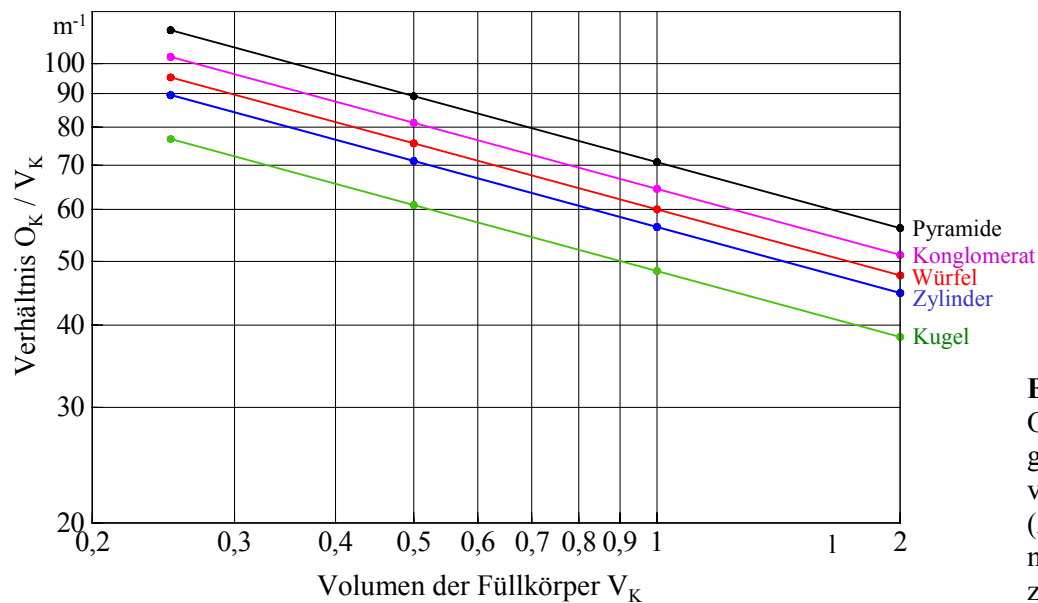


Bild 3.2 Verhältnis O_K / V_K in Abhängigkeit des Körpervolumens (Achsen logarithmisch geteilt, Abszissenmaßstab in Liter)

Erste Untersuchungen in [3] zeigten, dass der Würfel und das Konglomerat recht gute Übereinstimmung mit realen Partikelverteilungen ergeben. Es wurde deshalb vorgeschlagen, zusätzlich einen Quader zu betrachten, der aus zwei aneinandergfügten Würfeln besteht.

Die daraufhin in [3] an dem speziellen Schotter "Metagrauwacke Erzgebirge 45/150" vorgenommenen Untersuchungen ergaben die im Bild 3.3 gezeigten Ergebnisse.

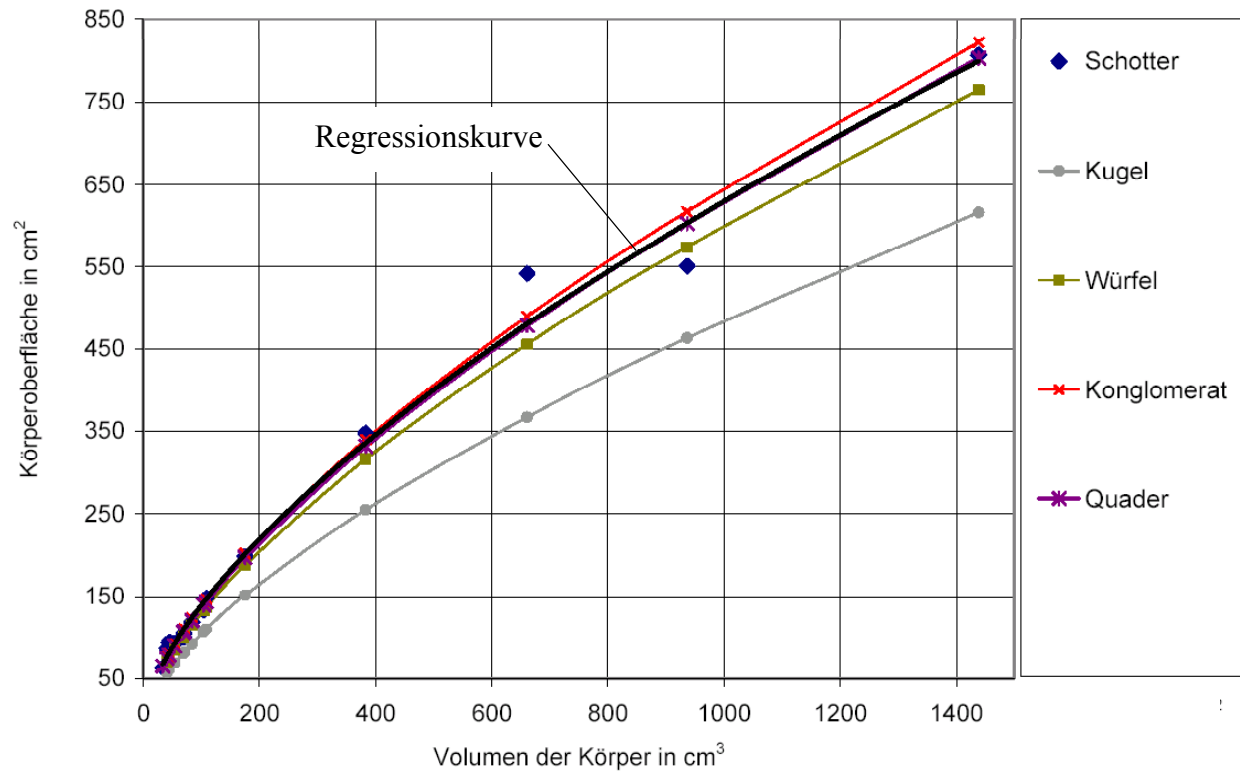


Bild 3.3 Oberfläche O_K als Funktion des Körpervolumens V_K nach [3]

Als **Regressionskurve** mit der Körperoberfläche O_K in cm^2 und dem Körpervolumen V_K in cm^3 wird angegeben:

$$O_K = 6,8209 (V_K)^{0,6552} . \quad (3.1)$$

Die in [3] vorgenommene zahlenmäßige Auswertung ergab, dass trotz der optisch guten Übereinstimmung mit dem Quader als "Doppelwürfel" im unteren Volumenbereich Abweichungen von ca. 4 % bestehen, dass bezogen auf das Konglomerat im oberen Bereich etwa 3 % auftreten usw.

Zusammenfassend wird daraus die Schlussfolgerung gezogen, einen **speziellen Partikelkörper als Quader mit quadratischer Grundfläche** zu kreieren. Die Wahl des Quadrats soll einerseits der gezeigten, guten Übereinstimmung mit dem Würfel Rechnung tragen und andererseits – wie später gezeigt wird – der Rechenbeschleunigung dienen. Für den speziellen Quader mit den Seitenabmessungen a , a , b , der einen exakten Zusammenhang nach Gl. (3.1) sichert, gelten:

$$V_K = a^2 b \quad (3.2)$$

$$O_K = 2 a^2 + 4 a b. \quad (3.3)$$

Weiter folgt die Bestimmungsgleichung

$$2 a^3 - O_K a + 4 V_K = 0. \quad (3.4)$$

Die Lösung dieser Sonderform der kubischen Gleichung beschäftigte um 1500 bis 1600 die Mathematiker und es existieren in Abhängigkeit der Radikanten zwei Lösungen von TARTAGLIA (fälschlicherweise nach CARDANO benannt) und von VIETA. Da die Handhabung sehr aufwändig ist, wird eine numerische Lösungsmethode mit der Wurzelanpassung nach der regula falsi bevorzugt.

Generell werden zwei Lösungen a_1 sowie a_2 ermittelt, die in der Regel $b_1 > a_1$ und $b_2 < a_2$, im Sonderfall $a = b$ enthalten. Sinnbildlich gesprochen, wird von einem Würfel ausgegangen, der zu einem Quader mit längerer oder kürzerer Seite als die Quadratseite entartet. Beide Lösungen werden im Rechenprogramm bestimmt und in einem relativ aufwändigen Verfahren gegenübergestellt. Es erfolgen nach einem noch vorzustellenden Algorithmus die Festlegung der Volumenelemente und die nach dem Stabilitätskriterium ermittelten maximalen Zeitschrittweiten $\Delta\tau_1$ sowie $\Delta\tau_2$. Die Paarung a_1, b_1 oder a_2, b_2 , welche die größte Zeitschrittweite zulässt, wird ausgewählt. Die relativ große Vorarbeit ist nur einmal in einem Vorprogramm zu leisten, sie lohnt sich in der Regel durch eine beschleunigte Rechnung in der Zeitschleife.

Beispiel zur Erläuterung (Bezeichnungen wie im Rechenprogramm):

Es gelten: $V(p)$ Partikelvolumen in cm^3 ; $O(p)$ Partikeloberfläche in cm^2 . Aus Tabelle 2.1 wird der Partikeltyp $p = 5$ betrachtet. Für das Volumen $V(5) = 221 \text{ cm}^3$ ergibt sich nach Gl. (3.1) die Oberfläche $O(5) = 234,36 \text{ cm}^2$.

Es folgen die Lösungen:

$$a_1(5) = 4,61 \text{ cm}; b_1(5) = 10,42 \text{ cm}$$

$$a_2(5) = 7,76 \text{ cm}; b_2(5) = 3,67 \text{ cm}.$$

Die Lösung 2 wird im weiteren Auswahlverfahren als vorteilhaft erkannt und deshalb verwendet.

Um **weitere Partikelkenngrößen** zu bestimmen, sind im Simulationsmodell noch einige Grunddefinitionen und -berechnungen erforderlich (Bezeichnungen wie im Rechenprogramm).

- Volumen des Feststoffes (Volumen aller Partikel im Speicher; PSI Hohlraumanteil in %)

$$V_{\text{fest}} = (1 - \text{PSI} / 100) \cdot \text{Hoehe} \cdot \text{Breite} \cdot \text{Laenge} \quad (3.5)$$

- Masse des Schotters (ρ Dichte des Gesteins)

$$m_{\text{fest}} = V_{\text{fest}} \cdot \rho \quad (3.6)$$

- Gesamtvolumen $V_{\text{Typ}}(p)$ der Partikeltypen p (Anteil(p) als Volumenanteil in %)

$$V_{\text{Typ}}(p) = \text{Anteil}(p) / 100 \cdot V_{\text{fest}} \quad (3.7)$$

- Partikelzahlen $ZP(p)$ pro Partikeltyp p (10^6 Umrechnungsfaktor cm^3 zu m^3)

$$ZP(p) = V_{\text{Typ}}(p) / V(p) \cdot 1000000 \quad (3.8)$$

- Anteile der Partikeloberflächen $O_{\text{anteil}}(p)$ an der Gesamtoberfläche des Schottermaterials

$$O_{\text{anteil}}(p) = O(p) \cdot ZP(p) / \sum_p (O(p) \cdot ZP(p)) \quad (3.9)$$

Die Ergebnisse für den Beispielschotterspeicher sind aus Tabelle 3.2 entnehmbar. Sie stellt die Fortsetzung der Tabelle 2.1 (Partikeldaten) dar.

Tabelle 3.2 Eingabedaten

Partikeldaten:

				Partikeltyp p					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Partikelvolumina in cm^3									
18,00	87,00	110,00	154,00	221,00	322,00	449,00	606,00	1150,00	0,00
Partikelanteile in %									
4,10	6,50	11,10	13,80	25,80	21,20	9,90	5,60	2,00	0,00
Partikeloberflächen in cm^2									
45,32	127,24	148,38	184,97	234,36	299,91	372,90	453,86	690,58	0,00
Approximierte Partikelquadratseite in cm									
3,53	3,30	3,59	6,93	7,76	5,27	5,94	10,62	12,95	0,00
Approximierte Partikellänge in cm									
1,45	7,99	8,54	3,21	3,67	11,58	12,72	5,37	6,86	0,00
Gesamtvolumen der approximierten Partikel in m^3									
3,73	5,92	10,10	12,56	23,48	19,29	9,01	5,10	1,82	0,00
Anzahl der approximierten Partikel									
207278	67989	91827	81545	106235	59913	20065	8409	1583	0
Anteile der Partikeloberflächen an der Gesamtoberfläche in %									
9,21	8,48	13,36	14,79	24,41	17,61	7,33	3,74	1,07	0,00

3.2 Approximierte Partikelgitter

Die instationäre dreidimensionale Wärmeleitung in den Partikeln mit einem Wärmeübergang an der Partikeloberfläche (Randbedingung 3. Art) wird mittels der Volumen-Elemente-Methode untersucht, wobei man vereinfacht Quaderelemente betrachtet. Sie füllen lückenlos das Partikelvolumen aus.

Anmerkung: Es wurde auch überlegt, mit einem Schalenmodell zu arbeiten, da dann nur eine eindimensionale Untersuchung des Wärmetransports – von Schale zu Schale – erforderlich würde. Die Genauigkeit der Lösung leidet aber darunter und die Schalengeometrie ist mathematisch

in der Regel auch nicht trivial zu beschreiben. Würde beispielsweise von der Körperform "Konglomerat" ausgegangen, so näherten sich mit zunehmender Tiefe die Schalen der Kugelform. Andererseits wäre das Minimalvolumen bestimmend für die maximale Zeitschrittweite, sodass kleine Zeitschrittweiten folgen würden.

Um kurze Rechenzeiten zu erzielen, sollen die vorhandenen Symmetrien in vollem Umfang genutzt werden.

- Symmetrieebenen im Partikelquader parallel zu den Oberflächen

Drei Symmetrieebenen teilen den quaderförmigen Partikel p so, dass generell nur $1/8$ des Körpers zu betrachten ist (Bild 3.4). Die Unterteilung des Partikelsimulationsgebietes in Volumenelemente und die Kennzeichnung des dreidimensionalen Gitters für Partikel p zeigt Bild 3.5.

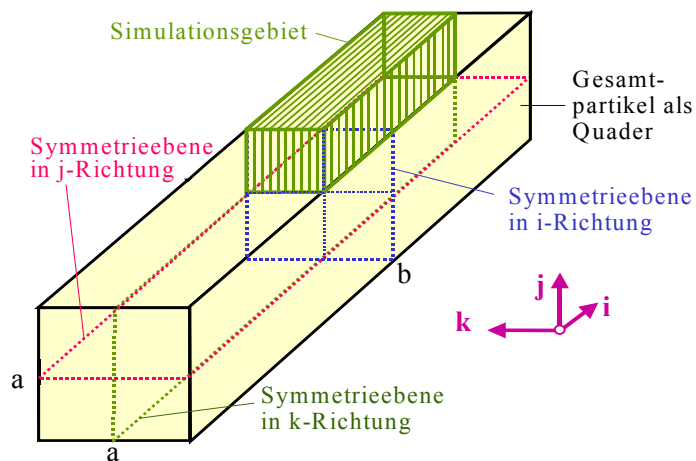


Bild 3.4 Gesamtpartikel als Quader $a \times a \times b$ mit Symmetrieebenen und Kennzeichnung des Simulationsgebietes (Quader $a/2 \times a/2 \times b/2$)

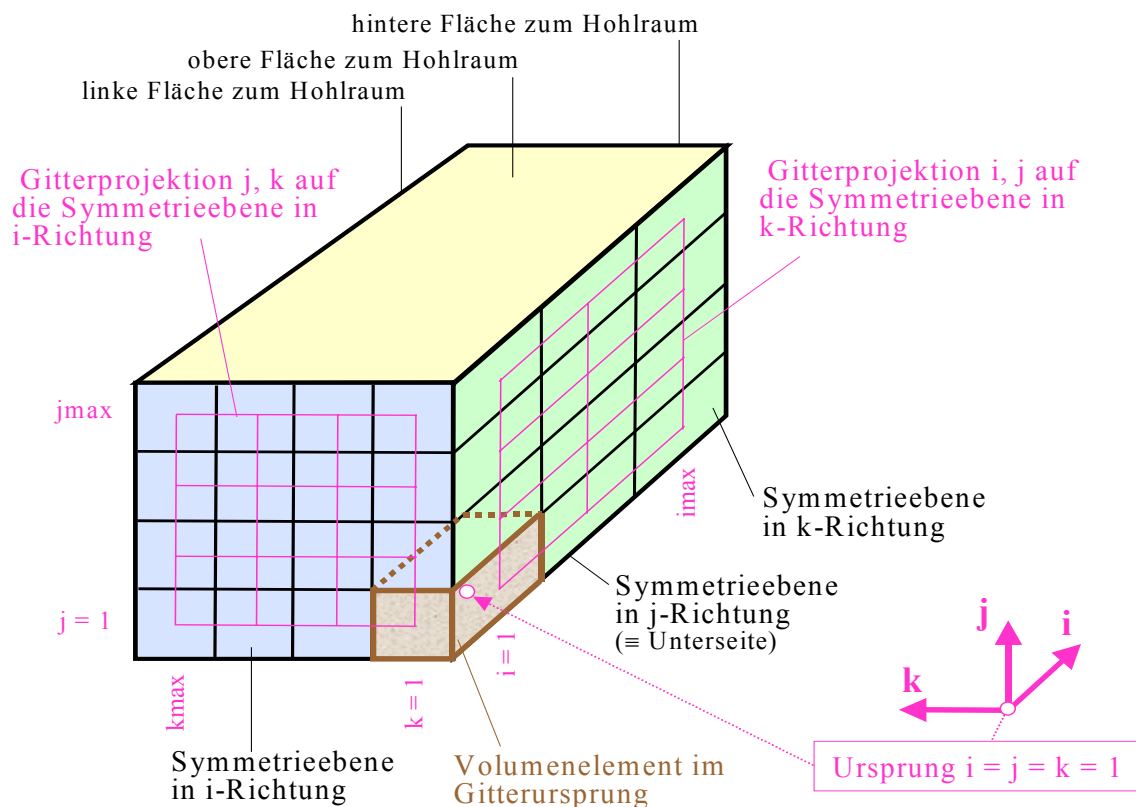


Bild 3.5 Partikelsimulationsgebiet mit Volumenelementen und dreidimensionalem Gitter

- **Spiegelebene innerhalb des Partikelsimulationsgebietes**

Das Simulationsgebiet wird zwar komplett betrachtet, aber die Volumenelemente besitzen teilweise wärmetechnisch spiegelbildliche Randbedingungen. Dies ist dadurch gegeben, da die Luftumströmung in den Hohlräumen als gleichartig angenommen wird.

Bild 3.6 zeigt, dass gleichfarbige Volumenelemente gleichen Randbedingungen unterliegen und somit auch gleiche Temperaturen besitzen müssen. Es existiert die eingetragene Spiegelebene innerhalb des j, k -Gitters, sodass allgemein gelten:

$$t(\dots, j, k) = t(\dots, k, j) . \quad (3.10)$$

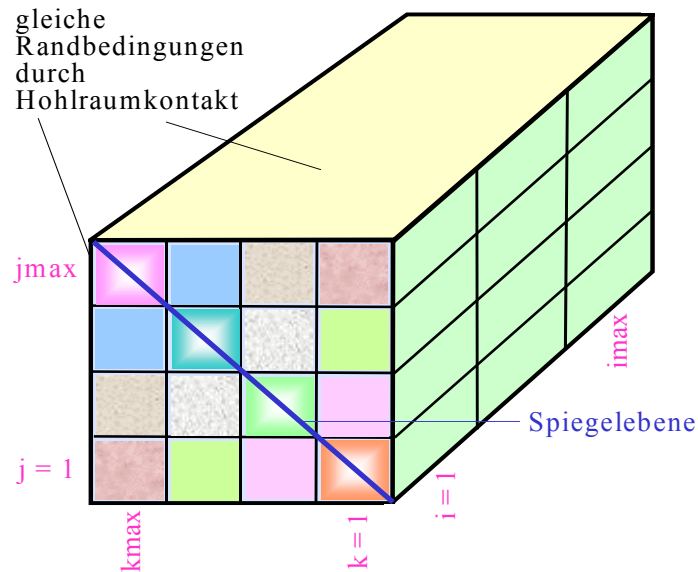


Bild 3.6 Spiegelebene innerhalb des j, k -Gitters

Gleichfarbige Volumenelemente haben gleiche wärmetechnische Randbedingungen und besitzen deshalb gleiche Temperaturen

Die Berechnungsalgorithmen sind so zu gestalten, dass nur die Volumenelemente, die sich oberhalb der Spiegelebene und auf der Spiegelebene befinden, in die Simulation einbezogen werden. Damit müssen die Berechnungen über $i = 1 \dots imax$; $j = 1 \dots jmax$ und $k = 1 \dots j$ anstelle von $k = 1 \dots kmax$ ($\equiv jmax$) laufen.

Die Temperaturen der restlichen Volumenelemente ergeben sich gemäß Gl. (3.10), indem für $j = 1 \dots jmax$ die Spiegelungen der Elementtemperaturen für $k = j+1 \dots kmax$ ($\equiv jmax$) zu erfolgen haben.

Somit treten die auf der Spiegelebene liegenden Volumenelemente je 8- und alle übrigen Volumenelemente je 16-mal pro Partikel p auf.

Infolge der gewählten Einteilung des Partikels in Volumenelemente und die Nutzung der Symmetrien und der Spiegelung sind nur etwas mehr als 1/16 aller realen Volumenelemente zu simulieren.

- **Automatische Festlegung der Partikelgitter**

Die Quaderbreite (\equiv Quaderhöhe) a sowie die Quaderlänge b (siehe Bild 3.4) – dargestellt in cm

– wird halbiert und durch den Ganzzahlanteil der jeweiligen Größe geteilt. Das Ergebnis ist j_{\max} ($\equiv k_{\max}$) bzw. i_{\max} .

Damit ergeben sich Volumenelemente mit Abmessungen zwischen 1 cm und < 2 cm.

Sollte bei sehr kleinen Partikeln $a/2$ oder $b/2$ kleiner 1 cm sein, wird j_{\max} ($\equiv k_{\max}$) bzw. i_{\max} gleich 1 gesetzt.

Es ergeben sich im Normalfall die Abmessungen der Volumenelemente zu:

$$\Delta x = \frac{a}{2} \frac{1}{\text{INT}(a/2)} \quad (3.11)$$

$$\Delta y = \frac{b}{2} \frac{1}{\text{INT}(b/2)}. \quad (3.12)$$

Selbstverständlich können – wenn erforderlich – die Abmessungen kleiner gewählt werden, was jedoch die Rechenzeit verlängert. Dies bedarf nur einer kleinen Algorithmusänderung, wie leicht zu erkennen ist.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Berechnungen selbstverständlich für alle Partikel p und die jeweils zwei Lösungen $a1(p)$, $b1(p)$ sowie $a2(p)$, $b2(p)$ erfolgen müssen. Somit ergeben sich die Indizierungen auch für die Größen in Programmschreibweise zu:

$$i_{\max 1}(p), j_{\max 1}(p), k_{\max 1}(p), D_{x1}(p), D_{y1}(p) \quad (3.13)$$

$$i_{\max 2}(p), j_{\max 2}(p), k_{\max 2}(p), D_{x2}(p), D_{y2}(p). \quad (3.14)$$

Damit existieren im Moment noch zwei Gittervarianten und Abmessungen der Volumenelemente pro Partikel p .

- **Stabilitätskriterium für die numerische Berechnung der Wärmeleitung im Partikel**

Verwendet man große Zeitschritte $\Delta\tau$, verkürzt sich die Rechenzeit für die durchzuführende Simulation. Das Ergebnis wird aber ungenauer, da man beim expliziten Verfahren den jeweiligen Istzustand über diesen Zeitraum als konstant betrachtet. Sind die Zeitschritte zu groß gewählt, entstehen numerische Schwingungen.

Die logischen Grenzen der möglichen Temperaturänderungen sind durch den II. Hauptsatz der Thermodynamik gegeben. So kann die neue Temperatur eines Volumenelementes z. B. nicht durch Wärmeaufnahme aus einer Umgebung niedrigerer Temperatur hervorgehen und umgekehrt.

Im vorliegenden Fall gilt aus Stabilitätsgründen folgende Beschränkung für den Zeitschritt:

$$\Delta\tau \leq \frac{1}{2a_F \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)}. \quad (3.15)$$

Wird dieser Grenzwert eingehalten, ist eine konvergente Lösungsentwicklung gegeben. Die Temperaturleitfähigkeit stellt einen stoffabhängigen Wert des Schottermaterials dar. Es gilt

$$a_F = \frac{\lambda}{\rho c}. \quad (3.16)$$

- **Endgültige Fixierung des Partikelgitters**

Wie im Abschnitt 3.1 bereits angesprochen, erfolgt die Auswahl der je zwei vorgeschlagenen Partikelgitter für die größtmögliche Zeitschrittweite. Werden die charakteristischen Größen in Gl. (3.15) eingesetzt, ergeben sich die Zeitschrittweiten in der Programmschreibweise $D\tau_{\text{Partikel1}}(p)$ und $D\tau_{\text{Partikel2}}(p)$. Der Vergleich liefert die für die Simulation verbindliche Auswahl aus den Gln. (3.13) und (3.14) zu:

$$i_{\max}(p), j_{\max}(p), k_{\max}(p), D_x(p), D_y(p), D\tau_{\text{Partikel}}(p). \quad (3.17)$$

- **Zeitschrittweite für die Simulation des Partikelgemisches**

Da sich für jedes Partikel p aufgrund der unterschiedlichen Volumina und Oberflächen unterschiedliche Charakteristika gemäß dem Ausdruck (3.15) ergeben, muss als verbindliche Zeitschrittweite für die Gesamtsimulation der Kleinstwert aus $D\tau_{\text{Partikel}}(p)$ gewählt werden. Die Ermittlung erfolgt als abgerundeter Ganzzahlwert:

$$D\tau = \text{INT}\{\text{MIN}[D\tau_{\text{Partikel}}(p)]\}. \quad (3.18)$$

Dieser Wert wird als maximal wählbare Zeitschrittweite ausgegeben.

Schließlich ist noch zu beachten, dass im Simulationsverlauf Stundenwerte auszugeben sind. Dies ist aber nur möglich, wenn die tatsächlich verwendete Zeitschrittweite in s in 1 h ($\equiv 3600$ s) ganzzahlig teilbar ist.

Ein entsprechender Algorithmus führt zu einem Vorschlag für die individuelle Eingabe.

- **Beispiel**

Das bereits vorgestellte Beispiel wird in Tabelle 3.3 bezüglich der Eingabewerte und der anschließenden Datenaufbereitung komplett wiedergegeben.

Tabelle 3.3 Ursprüngliche und aufbereitete Eingabedaten

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\TEST1\

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung
Speicherabmessungen und Luftvolumenstrom:

Höhe m	Breite m	Länge m	Luftvolumenstrom m ³ /h
2,500	10,000	6,500	30000,0

Daten des Speichermaterials:

Rho kg/m ³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Hohlraumanteil %	Äquivalenter Durchmesser mm
2754,0	2,300	850,000	44,0	70,66

Schottervolumen m ³	Schottermasse kg	Luftvolumen m ³
91,00	250614,000	71,50

Partikeldaten:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Partikelvolumina in cm ³									
18,00	87,00	110,00	154,00	221,00	322,00	449,00	606,00	1150,00	0,00
Partikelanteile in %									
4,10	6,50	11,10	13,80	25,80	21,20	9,90	5,60	2,00	0,00
Partikeloberflächen in cm ²									
45,32	127,24	148,38	184,97	234,36	299,91	372,90	453,86	690,58	0,00
Approximierte Partikelquadratseite in cm									
3,53	3,30	3,59	6,93	7,76	5,27	5,94	10,62	12,95	0,00
Approximierte Partikellänge in cm									
1,45	7,99	8,54	3,21	3,67	11,58	12,72	5,37	6,86	0,00
Gesamtvolumen der approximierten Partikel in m ³									
3,73	5,92	10,10	12,56	23,48	19,29	9,01	5,10	1,82	0,00
Anzahl der approximierten Partikel									
207278	67989	91827	81545	106235	59913	20065	8409	1583	0
Anteile der Partikeloberflächen an der Gesamtoberfläche in %									
9,21	8,48	13,36	14,79	24,41	17,61	7,33	3,74	1,07	0,00

Gitterdarstellung der Partikel und Ermittlung des maximalen Zeitschrittes:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Unterteilung der halben Quadratseite: Dx(p) in cm									
Maximale Gitternummer: jmax(p) = kmax(p)									
1,76	1,65	1,79	1,16	1,29	1,32	1,49	1,06	1,08	0,00
1	1	1	3	3	2	2	5	6	0

Unterteilung der halben Quaderlänge: $Dy(p)$ in cm									
Maximale Gitternummer: $imax(p)$									
0,72	1,33	1,07	1,60	1,84	1,16	1,06	1,34	1,14	0,00
1	3	4	1	1	5	6	2	3	0
Maximale Zeitschrittweite für die Partikelapproximation: $DtauPartikel(p)$ in s									
19,90	39,19	33,96	26,96	34,09	26,83	28,32	21,87	20,50	0,00

Maximal wählbare Zeitschrittweite: 19 s
 Vorgeschlagene Zeitschrittweite: 18 s (ganzzahlig in 3600 s enthalten)

3.3 Idealisierte Speichermodellierung

Gemäß Bild 3.7 wird der Speicher in seiner Länge in s_{max} Abschnitte unterteilt. Sie sind alle gleich lang, sodass die Teillängen jeweils

$$\Delta L = \frac{L}{s_{max}} \quad (3.19)$$

betragen. Die Anzahl der Längenunterteilungen s_{max} stellt einen Eingabewert dar. Er sollte zwischen 50 und 100 gewählt werden, wobei wiederum ein Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit zu treffen ist.

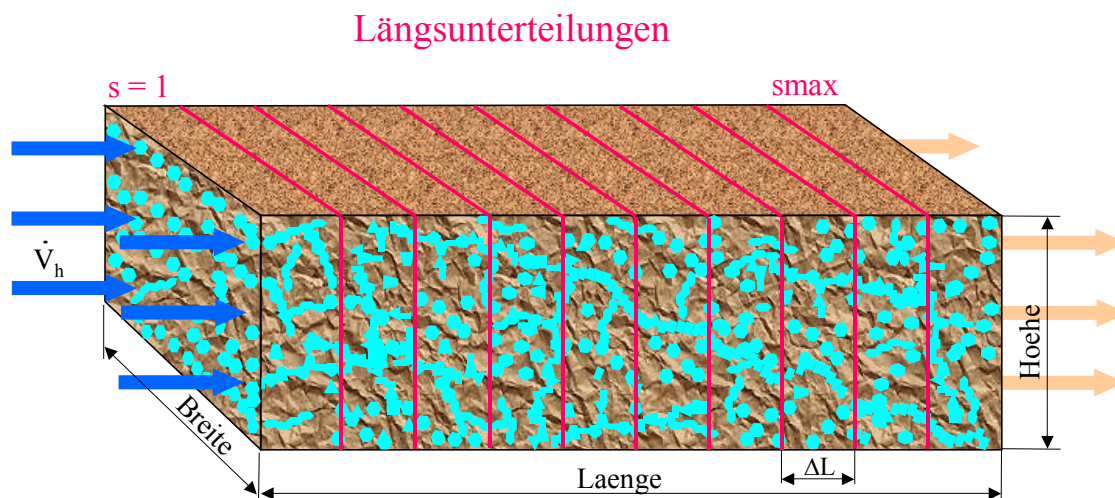


Bild 3.7 Speicher mit seinen Abmessungen in Programmschreibweise und mit s_{max} Längenunterteilungen

Für den Speicherkörper gelten:

- Alle Stoffeigenschaften der Partikel p im Speichervolumen gelten ortsunabhängig.
- Die Partikel p sind regellos angeordnet und grenzen mit ihren Oberflächen an Hohlräume.
- Alle Partikel p sind im Speichervolumen gleichverteilt, d. h., die in Tabelle 3.3 vorgestellten, auf das Gesamtvolumen bezogenen Partikelgrößen gelten anteilig für jeden Speicherabschnitt.
- Somit sind auch die Hohlräume homogen im Speichervolumen verteilt, sodass in jeder

Schnittebene – gebildet aus Breite \times Hoehe – der freie Durchströmquerschnitt FF existiert:

$$FF = PSI \cdot \text{Breite} \cdot \text{Hoehe} . \quad (3.20)$$

- Die Luftdurchströmung ist in Richtung der Speicherlänge definiert. Sie wird als homogen angenommen.
- Die Abmessungen des Speichervolumens sind so festzulegen, dass der Hauptdurchströmbe-
reich der Luft wiedergegeben wird. Da die Luftvertei- und -sammelvorrichtungen unter-
schiedliche Ausbildung haben, müssen ingenieurmäßige Abschätzungen einbezogen werden.

4 Wärmetechnische Randbedingungen und Zeitverläufe

Es wird angenommen, dass der Schotterspeicher allseits **adiabate Oberflächen** besitzt, sodass kein Wärmeaustausch mit dem Erdreich erfolgt. Diese Annahme ist sicherlich nur bedingt realis-
tisch. Die getroffene Annahme wird vor allem damit begründet, dass der Schotterspeicher als
Tagesspeicher betrieben werden soll und der Wärmeaustausch mit der durchströmenden Luft
maßgeblich dominiert. Des Weiteren ist – wie bereits erläutert – die Luftdurchströmung nicht
homogen, weshalb die Fixierung der effektiven Speicherabmessungen (Laenge, Breite, Hoehe)
sich kleiner als die gesamte Schotterfüllung darstellt. Dadurch ergeben sich Randbereiche, die
ohnehin "wärmedämmend" zum Erdreich wirken.

Die **Luftbeaufschlagung** ist durch die beiden Zustandsgrößen

- Lufteintrittstemperatur $t_{\text{Lein}}(\text{ETag}, \text{Stunde})$
- Lufteintrittsfeuchte $x_{\text{Lein}}(\text{ETag}, \text{Stunde})$

als Zeitfunktionen charakterisiert.

Außerdem kann der Auslegeluftvolumenstrom V_h reduziert sein, was durch

- $V_{\text{Lanteil}}(\text{ETag}, \text{Stunde})$

im Bereich 0 ... 1 beschrieben wird.

Schließlich ist die Strömungsrichtung der Luft im Speicher umkehrbar, sie werde durch

- $R(\text{ETag}, \text{Stunde})$

mit 1 oder -1 angegeben. Die Eingabe 0 deutet auf den Stillstand des Luftstromes hin.

Die Beschreibung der vorgestellten Größen erfolgt mit **stündlichen Stützstellen** (Stunde als Ta-
gesstunde), wobei $t_{\text{Lein}}(\text{ETag}, \text{Stunde})$ und $x_{\text{Lein}}(\text{ETag}, \text{Stunde})$ dazwischen linear interpoliert
werden. $V_{\text{Lanteil}}(\text{ETag}, \text{Stunde})$ und $R(\text{ETag}, \text{Stunde})$ gelten für die gesamte Stunde.

Die Zeitverläufe sind weiterhin für unterschiedliche **Entwurfstage** (\equiv Designdays) zu kreieren.

Wobei für die Simulation zunächst der zu betrachtende Entwurfstag ETag_{fix} auszuwählen ist,

sodass $E_{\text{Tag}} = E_{\text{Tagfix}}$ gilt. Dieser Entwurfstag wird dann wiederholt abgearbeitet, wie es die gewünschte Betriebsstundenanzahl BS erfordert.

Durch einen – später noch vorzustellenden Trick – können auch mehrere, unterschiedliche Entwurfstage nacheinander simuliert werden.

Um Testreferenzjahre zu simulieren, wäre eine Programmergänzung notwendig.

Derzeit sei angenommen, dass beispielsweise die Simulation für typische jahreszeitliche Entwurfstage ausreichend ist, um das Leistungsvermögen des Schotterspeichers bewerten zu können. Tagesgänge des Luftzustandes sind aus der DIN 4710:2003-01 zu entnehmen. Tabelle 4.1 zeigt eine Auswahl für den Standort Kassel:

- Entwurfstag 2: Heiterer Februartag nach DIN 4710
- Entwurfstag 3: Heiterer Julitag nach DIN 4710
- Entwurfstag 4: Extremer Sommertag.

Der extreme Sommertag ist eigenständig kreiert worden, wobei sich an die maximal vorkommenden Lufttemperaturen gemäß t_x -Korrelation der DIN 4710 angelehnt wurde. Die mittleren Luftfeuchten werden ohne exakte Wissensbasis aber in Kenntnis, dass auch höhere Luftfeuchten nach den t_x -Kombinationen auftreten, gegenüber den mittleren Juliwerten um $\Delta x = 1 \text{ g}_w/\text{kg}_{tL}$ erhöht.

Entwurfstag 1 wurde für die Beschreibung eines winterlichen Auslegungstages – beispielsweise mit einer konstanten Außentemperatur von -12°C – reserviert.

Das Rechenprogramm sieht die Definition von bis zu 20 Entwurfstagen vor.

Tabelle 4.1 Mittlere stündliche Außenlufttemperatur t_a und Außenluftfeuchte x_a für ausgewählte Tage des Jahres am Standort Kassel (Entwurfstage 2 und 3 entsprechen den Werten nach DIN 4710, Entwurfstag 4 ist ein synthetischer Extrehtag in Anlehnung an die in der Norm gegebene t_x -Korrelation)

Tagesstunde	Heiterer Februartag ≡ Entwurfstag 2			Heiterer Julitag ≡ Entwurfstag 3			Extremer Sommertag ≡ Entwurfstag 4	
	t_a $^\circ\text{C}$	x_a $\text{g}_w/\text{kg}_{tL}$		t_a $^\circ\text{C}$	x_a $\text{g}_w/\text{kg}_{tL}$		t_a $^\circ\text{C}$	x_a $\text{g}_w/\text{kg}_{tL}$
1	-3,8	2,4		16,1	9,2		21,5	10,2
2	-4,2	2,4		15,4	9,1		20,8	10,1
3	-4,7	2,4		14,7	8,9		20,4	9,9
4	-5,1	2,3		14,1	8,8		20,0	9,8
5	-5,4	2,3		14,1	8,7		20,2	9,7
6	-5,6	2,3		14,8	8,9		20,5	9,9
7	-5,9	2,3		16,4	9,2		22,0	10,2

Tabelle 4.1 Fortsetzung

Tagesstunde	Heiterer Februartag ≡ Entwurfstag 2		Heiterer Julitag ≡ Entwurfstag 3		Extremer Sommertag ≡ Entwurfstag 4	
	t_a °C	x_a g _W /kg _{tL}	t_a °C	x_a g _W /kg _{tL}	t_a °C	x_a g _W /kg _{tL}
8	-5,4	2,3	18,9	9,4	24,5	10,4
9	-4,3	2,4	21,3	9,5	27,0	10,5
10	-2,5	2,5	23,4	9,4	29,0	10,4
11	-0,8	2,4	24,9	9,0	31,0	10,0
12	0,8	2,4	25,9	8,7	32,0	9,7
13	2,0	2,4	26,7	8,6	32,7	9,6
14	2,8	2,3	27,1	8,5	33,4	9,5
15	3,1	2,3	27,4	8,5	33,8	9,5
16	2,5	2,3	27,4	8,4	34,0	9,4
17	1,3	2,3	26,8	8,5	33,5	9,5
18	0,4	2,3	26,0	8,6	32,0	9,6
19	-0,6	2,4	24,7	8,8	30,0	9,8
20	-1,3	2,4	23,2	9,0	27,9	10,0
21	-1,9	2,4	21,9	9,2	26,0	10,2
22	-2,5	2,4	20,6	9,3	24,7	10,3
23	-3,1	2,4	19,5	9,4	23,5	10,4
24	-3,5	2,4	18,5	9,5	22,0	10,5

Interessant sind auch die Tagesverläufe des Außenluftzustandes in der t_a, x_a -Darstellung, die das Bild 4.1 zeigt. Für den Entwurfstag 3 – "Heiterer Sommertag im Juli" – sind an den Eckpunkten des Zustandsverlaufes zusätzlich die Tageszeiten vermerkt.

In vielen Anwendungsfällen wird es ausreichend sein, mit einer Annahme für die mittlere Luftfeuchte über den Tag zu arbeiten. Als mittlere Tageswerte gelten nach DIN 4710 für den

Entwurfstag 2 "Heiterer Februartag": $x_{a,Mittel,Februar} = 2,4 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$

Entwurfstag 3 "Heiterer Julitag": $x_{a,Mittel,Juli} = 9,0 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$.

Analog gilt ohne Normbezug:

Entwurfstag 4 "Extremer Sommertag": $x_{a,Mittel,Extremtag} = 10,0 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$.

Die eingegebenen und gespeicherten Zeitverläufe für die maximal 20 vordefinierten Entwurfstage können als Tabelle oder als Grafik angezeigt und ausgedruckt werden (Tabelle 4.2 und Bilder 4.2 bis 4.5).

Hierbei ist die Ergänzung der relativen Feuchte der besseren Anschaulichkeit wegen möglich, sie wird programmintern automatisch berechnet.

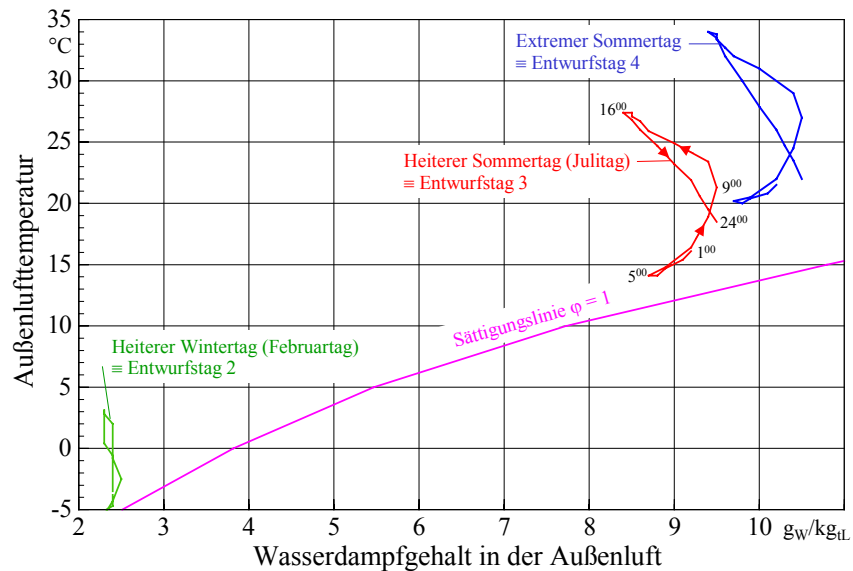


Bild 4.1 Außenluftzustandsverläufe (Lufttemperatur und Luftfeuchte) für drei ausgewählte Entwurfstage im Tagesgang

Tabelle 4.2 Beispielausdruck für Entwurfstag 3

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\TEST1\

Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 3:

Tages- stunde	tL °C	xL g/kg	phiL %	VLanteil -	Richtung -
1	16,1	9,2	79,7	1,00	-1
2	15,4	9,1	82,4	1,00	-1
3	14,7	8,9	84,4	1,00	-1
4	14,1	8,8	86,7	1,00	-1
5	14,1	8,7	85,8	1,00	-1
6	14,8	8,9	83,8	1,00	-1
7	16,4	9,2	78,2	0,50	1
8	18,9	9,4	68,2	0,50	1
9	21,3	9,5	59,4	0,50	1
10	23,4	9,4	51,7	0,50	1
11	24,9	9,0	45,3	1,00	1
12	25,9	8,7	41,3	1,00	1
13	26,7	8,6	38,9	1,00	1
14	27,1	8,5	37,6	1,00	1
15	27,4	8,5	36,9	1,00	1
16	27,4	8,4	36,5	1,00	1
17	26,8	8,5	38,3	1,00	1
18	26,0	8,6	40,6	1,00	1
19	24,7	8,8	44,8	0,50	1
20	23,2	9,0	50,2	0,50	1
21	21,9	9,2	55,5	1,00	-1
22	20,6	9,3	60,7	1,00	-1
23	19,5	9,4	65,7	1,00	-1
24	18,5	9,5	70,7	1,00	-1

Legende:

tL Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes

xL Verlauf der absoluten Feuchte des Luftvolumenstromes

phiL Verlauf der relativen Feuchte des Luftvolumenstromes

VLanteil Anteil des Luftvolumenstromes vom Maximalwert

Richtung Richtung des Luftstromes: Normalrichtung 1; Gegenrichtung -1, Stillstand 0

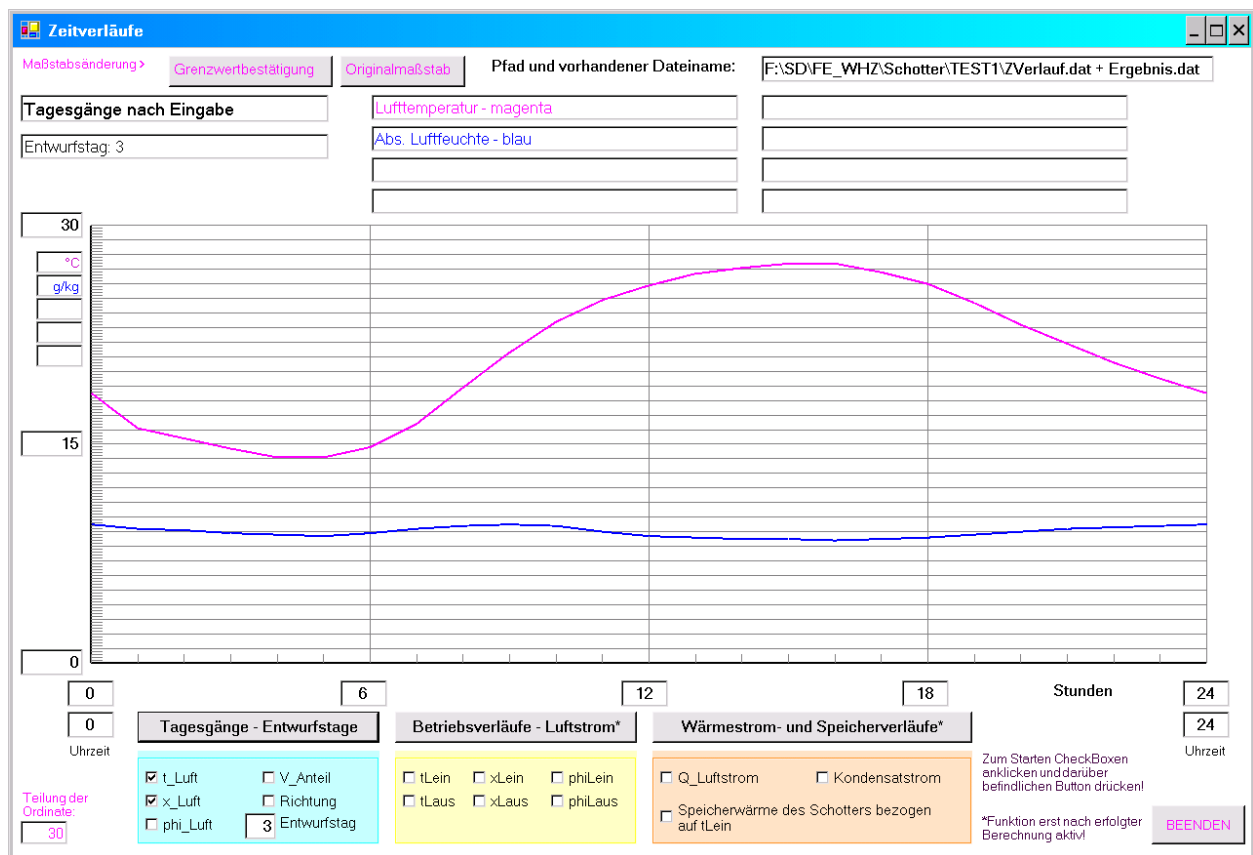


Bild 4.2 Verläufe Lufttemperatur und absolute Luftfeuchte für Entwurfstag 3

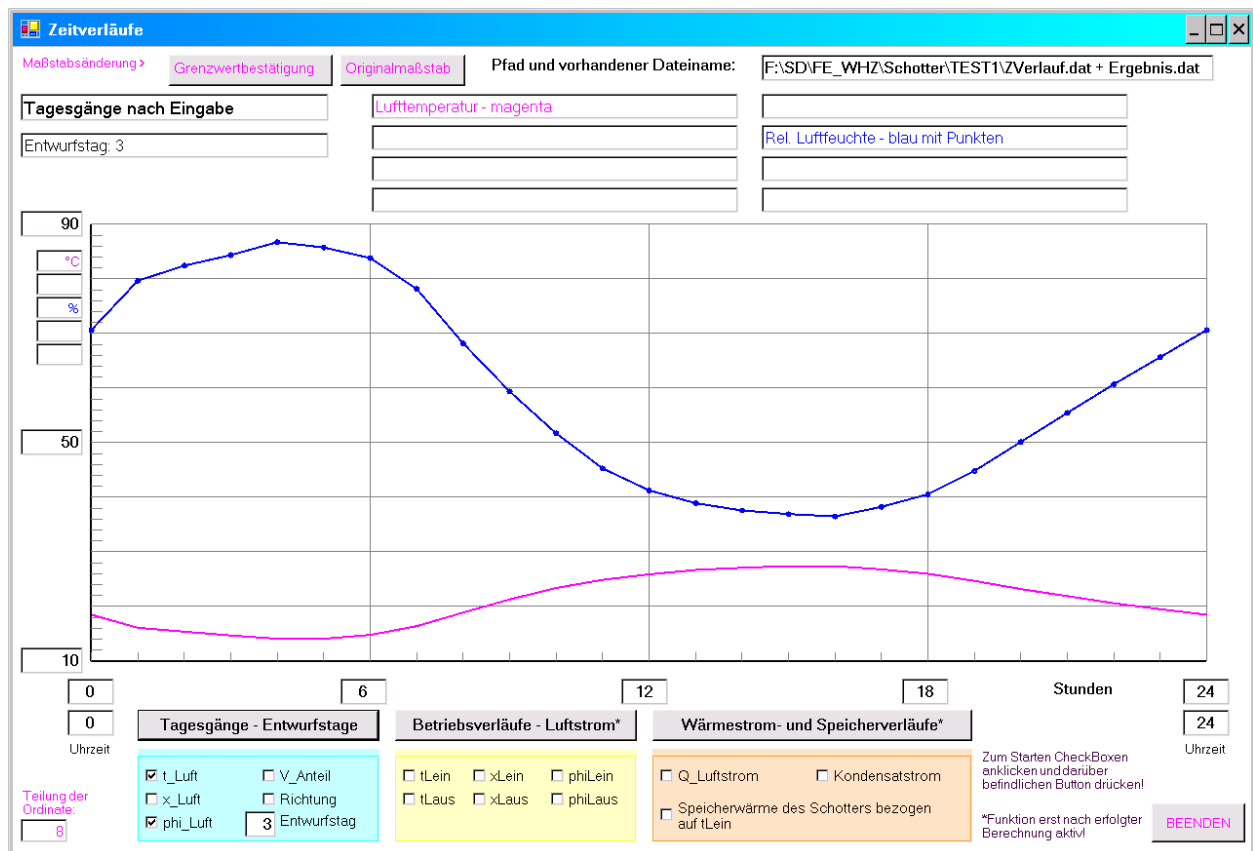


Bild 4.3 Verläufe Lufttemperatur und relative Luftfeuchte für Entwurfstag 3

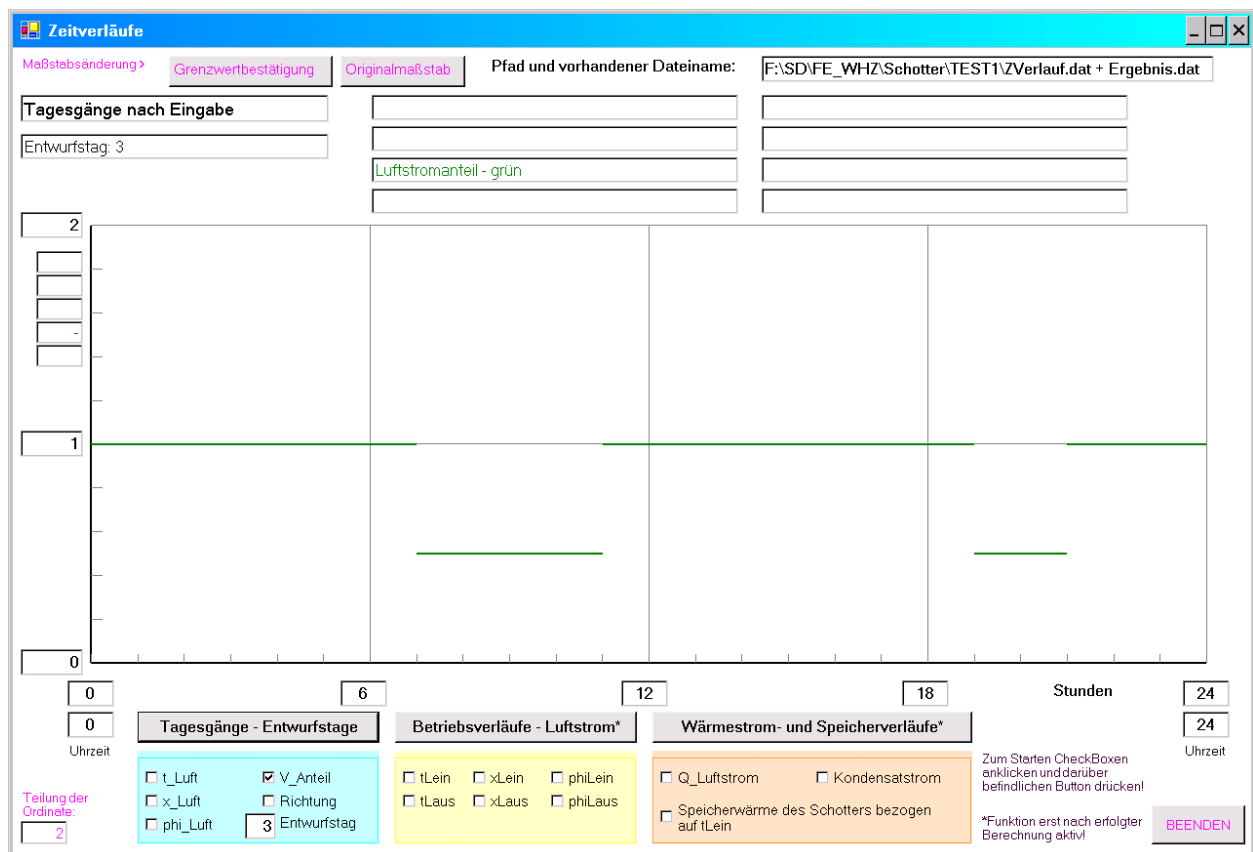


Bild 4.4 Verlauf des Luftstromanteils bezogen auf den Maximalwert (Auslegungszustand) für Entwurfstag 3

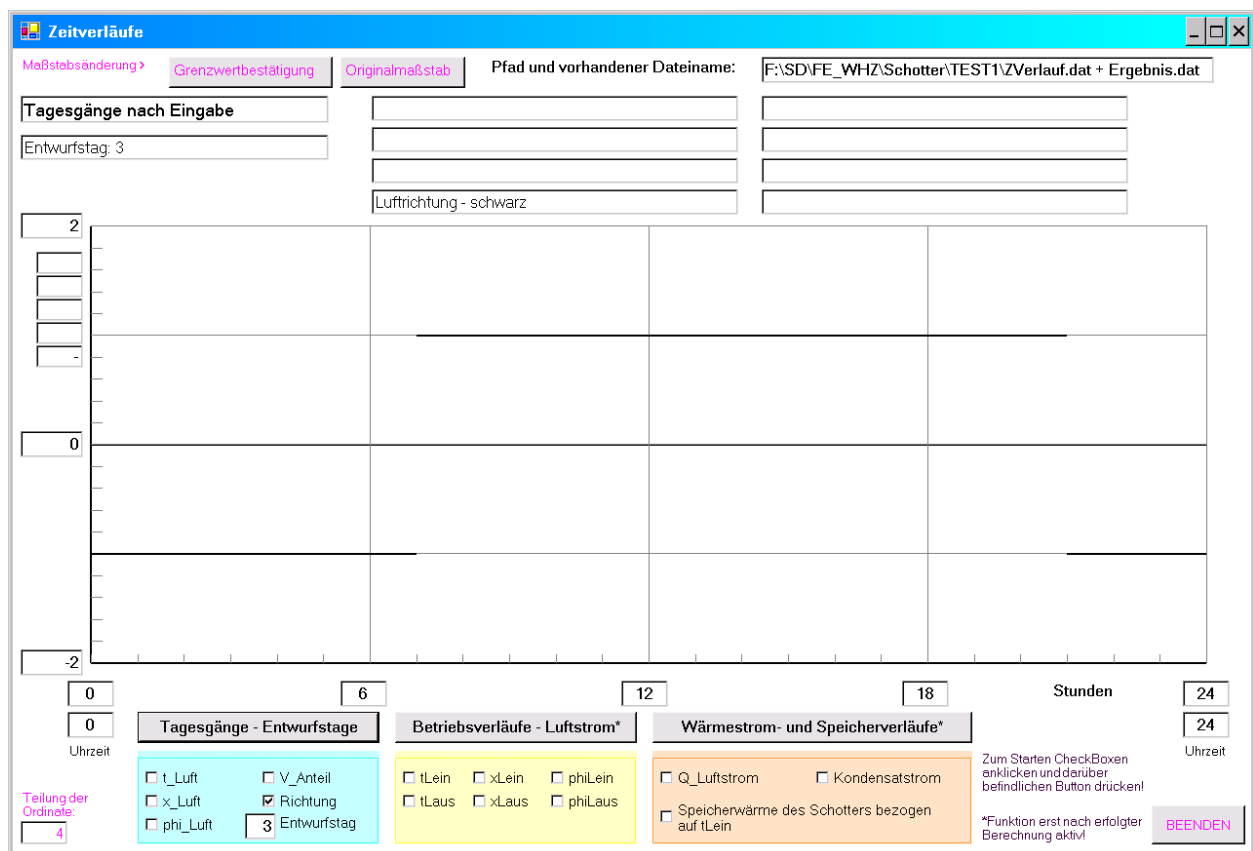


Bild 4.5 Verlauf der Luftstromrichtung für Entwurfstag 3

Hinweis: Die Größe des Luftstromanteils und die Luftstromrichtung gilt stets für die betrachtete Stunde, genaugenommen bis zum letzten Zeitschritt innerhalb der Stunde. Dies ist beispielsweise bis 15 s vor Beginn der nächsten vollen Stunde.

5 Thermodynamische Modellierung

Der **Wärmetransport** im Speicher wird als **mehrstufiger Vorgang** betrachtet:

- Im Inneren der Partikel erfolgt eine **instationäre Wärmeleitung** zwischen den Volumenelementen.
- An den Partikeloberflächen vollzieht sich ein **konvektiver Wärmeaustausch** mit der Luft, die durch die Hohlräume strömt. Zur Ermittlung der abschnittsweise geltenden Wärmeübergangskoeffizienten wird vereinfacht ein Modell der gleichmäßigen Partikelumströmung gewählt. Dieses ist bei genauerem Erkenntnisstand gegebenenfalls zu verbessern.
- Die beiden vorgenannten Wärmeübertragungsmechanismen werden für alle Partikeltypen p innerhalb eines Zeitschrittes $\Delta\tau$ und innerhalb des Speicherabschnittes s untersucht. Während $\Delta\tau$ und innerhalb s gelten **konstante Randbedingungen**. Dies sind in Programmschreibweise:
 - die Temperaturen der Volumenelemente $t(s, p, i, j, k)$
 - die Lufttemperaturen in den Speicherabschnitten $t_L(s)$
 - die Luftfeuchte in den Speicherabschnitten $x_L(s)$
 - die Wärmeübergangskoeffizienten an den Partikeloberflächen $\alpha_L(s)$.
- Am **Ende eines Zeitschrittes** sind alle vorgestellten **Zustandsbedingungen neu zu bestimmen**.

Für die Volumenelemente der Partikel p ist dies relativ leicht möglich, da sie die Wärme nur sensibel speichern können und die Zeitschrittweite so festgelegt wurde, dass keine Instabilitäten auftreten können.

Bezüglich der Zustandsänderungen in den Speicherabschnitten bedarf es relativ umfangreicher Betrachtungen. Die Änderung des Luftzustandes ist über eine Enthalpiebilanz durchzuführen. Stabilitätsbetrachtungen sind wegen der sehr geringen Wärmespeicherkapazität der Luft zusätzlich erforderlich, was besonders bei geringen Luftmassenströmen durch den Schotter und großen Zeitschrittweiten relevant ist.

Die Änderung der Luftfeuchte infolge **Kondensation** wird wegen der zahlreichen Unwägbarkeiten nur bilanzmäßig erfasst, ohne den Kondensationsvorgang an der Partikeloberfläche

direkt zu berechnen. Falls sich dies als erforderlich erweisen sollte, wären Programmergänzungen möglich. Ob diese zu einer wesentlichen Genauigkeitsverbesserung führen würden ist aber sehr fraglich, da beispielsweise über die Kondensatabführung von den Partikeln nur in grober Weise spekuliert werden könnte.

Eine eventuelle Erhöhung der Luftfeuchte durch benetzte Partikeloberflächen (Verdunstung) findet generell keine Beachtung.

- Die Luft tritt bei $\text{Richtung} (\equiv R(\text{ETag}, \text{Stunde})) = 1$ im Abschnitt $s = 1$ in den Speicherkörper ein und verlässt diesen bei $s = \text{smax}$ (vgl. Bild 3.7). Am Eintritt liegt der Zustand Lufteintrittstemperatur $t_{\text{Lein}}(\text{ETag}, \text{Stunde})$; Lufteintrittsfeuchte $x_{\text{Lein}}(\text{ETag}, \text{Stunde})$ vor.

Der Austrittszustand der Luft ist unter $t_L(\text{smax} + 1)$ sowie $x_L(\text{smax} + 1)$ abgespeichert.

Bei $\text{Richtung} = -1$ liegt der Eintritt bei $s = \text{smax}$ und der Austritt bei $s = 1$.

Folgerichtig ist der Austrittszustand der Luft unter $t_L(0)$ sowie $x_L(0)$ vermerkt.

Das Verfolgen der Zustandsgrößen entspricht dem bekannten "[Upwind-Verfahren](#)".

- Bei Stillstand des Speichers gelten besondere Festlegungen. Der Wärmetransport innerhalb der Partikel wird instationär in genauer Weise betrachtet. Es erfolgt jedoch kein konvektiver Wärmetransport an die stehende Luft in den Hohlräumen.

Dies ist eine sehr vereinfachte Annahme, die nur den Temperatúrausgleich innerhalb der Partikel betrachtet, nicht aber zwischen den Partikeln innerhalb der Schüttung.

Eine weitergehende Betrachtung erscheint ohnehin fragwürdig, denn die Eigenkonvektion der eingeschlossenen Luft ist kaum realistisch modellierbar. Des Weiteren wird der Schotterspeicher zum Erdreich hin als adiabat betrachtet, was bei langen Stillstandszeiten auch nicht zutreffend ist. Bei kurzen Betriebspausen erscheint die Modellierung jedoch durchaus als wirklichkeitsnah.

- Zu jeder [vollen Stunde \(Betriebsstunde BS\)](#) werden für die spätere Auswertung des Speicherbetriebes nachfolgende Größen ermittelt und in der Datei "[Ergebnis.dat](#)" gespeichert:
 - [Richtung \(BS\)](#)
 - [Tagestunde \(BS\)](#)
 - [tLein \(BS\)](#)
 - [xLein \(BS\)](#)
 - [phiLein \(BS\)](#)

- tLaus (BS)
- xLaus (BS)
- phiLaus (BS)
- QMedium (BS) {≡ Wärmestrom an die Luft}
- Kondensatmenge (BS)
- QSpeicher (BS).

Die zuletzt genannte Größe erfasst die in den Partikeln gespeicherte Wärme bezogen auf die momentane Lufteintrittstemperatur und stellt somit das momentane, theoretische **Kühl- bzw. Heizpotenzial** dar.

- Am Ende der Simulation wird das gesamte Temperaturfeld in den modellierten Partikeln aller Speicherabschnitte $t(s, p, i, j, k)$ in der Datei "**Speicherfeld.dat**" für weitere Simulationen als mögliche Startoption gespeichert.
- Weitere Spezialausgaben, die
 - den Zustandsverlauf der Luft in den Speicherabschnitten $tL(s)$ und $xL(s)$
 - die Kern- und Oberflächentemperatur in einem vorbestimmten Partikel $tK(s)$ und $tOF(s)$

charakterisieren, sind zu einer bestimmten vorgewählten Zeit $BS = BS_{Test}$ sowie für einen Partikel $p = p_{Test}$ möglich. Beide Größen BS_{Test} und p_{Test} stellen Eingabewerte dar. Die Verläufe für die Speicherabschnitte s werden in der Datei "**Speicherverlauf.dat**" abgelegt. Anhand dieser Ergebnisse kann man beispielsweise beurteilen, inwieweit die gewählten Konstruktionsparameter des Schotterspeichers sinnvoll sind.

5.1 Instationäre Wärmeleitung zwischen den Volumenelementen

Die instationäre Wärmeleitung im Inneren des Speicherkörpers kann durch die Wärmeströme, die die sechs Oberflächen des Quaderelementes passieren, ihre Bilanzierung und die daraus resultierende Temperaturänderung im Volumenelement numerisch nachgebildet werden. Im Bild 5.1 ist für den im Speicherabschnitt s liegenden Partikeltyp p ein Volumenelement im Gitternetz an der Stelle i, j, k gezeigt, und die durch die Oberflächen tretenden Wärmeströme sind dargestellt.

Nach dem FOURIERSchen Erfahrungsgesetz der Wärmeleitung lautet der Wärmestrom \dot{Q}

$$\dot{Q} = -\lambda \frac{dt}{dn} A \quad (5.1)$$

mit

λ Wärmeleitfähigkeit

A Fläche, in der die Isothermenfläche t liegt

dt/dn Temperaturgradient.

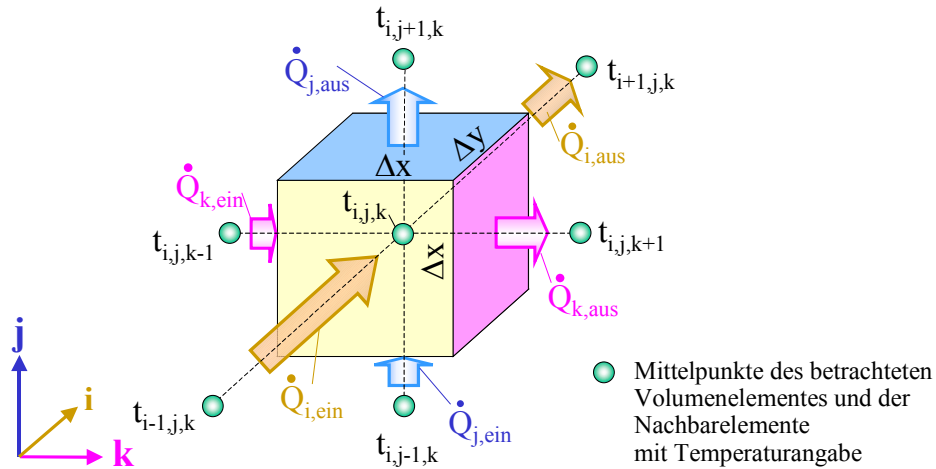


Bild 5.1 Quaderelement $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ im Gitternetz an der Stelle i, j, k mit der Temperatur $t_{i,j,k}$ sowie Kennzeichnung der Temperaturen der Nachbarelemente und die durch Wärmeleitung übertragenen Wärmeströme

Für die Wärmeleitung von Volumenelement zu Volumenelement durch eine gemeinsame Berührungsfläche nach Bild 5.1 gilt beispielsweise für den in Richtung j eintretenden Wärmestrom:

$$\dot{Q}_{j,\text{ein}} = \lambda \frac{t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}}{\Delta x} \Delta x \Delta y,$$

wobei im Zeitintervall $\Delta \tau$ die Wärme

$$Q_{j,\text{ein}} = \lambda \frac{t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}}{\Delta x} \Delta x \Delta y \Delta \tau \quad (5.2)$$

übertragen wird. In analoger Weise gelten:

$$Q_{j,\text{aus}} = \lambda \frac{t_{i,j,k} - t_{i,j+1,k}}{\Delta x} \Delta x \Delta y \Delta \tau \quad (5.3)$$

$$Q_{k,\text{ein}} = \lambda \frac{t_{i,j,k-1} - t_{i,j,k}}{\Delta x} \Delta x \Delta y \Delta \tau \quad (5.4)$$

$$Q_{k,\text{aus}} = \lambda \frac{t_{i,j,k} - t_{i,j,k+1}}{\Delta x} \Delta x \Delta y \Delta \tau \quad (5.5)$$

$$Q_{i,\text{ein}} = \lambda \frac{t_{i-1,j,k} - t_{i,j,k}}{\Delta y} \Delta x \Delta x \Delta \tau \quad (5.6)$$

$$Q_{i,\text{aus}} = \lambda \frac{t_{i,j,k} - t_{i+1,j,k}}{\Delta y} \Delta x \Delta x \Delta \tau. \quad (5.7)$$

Hinweis: In i -, j -, k -Richtung existieren nach Bild 3.5 gemäß den Symmetriebedingungen an den Stellen $i = 1$, $j = 1$ bzw. $k = 1$ keine eintretenden Wärmeströme.

Zur rechentechnischen Vereinfachung werden in Programmschreibweise die folgenden Abkürzungen gebildet:

$$AEi(p) = Dx(p) \cdot Dx(p) \cdot Dtau \quad (5.8)$$

$$AE(p) = Dx(p) \cdot Dy(p) \cdot Dtau \quad (5.9)$$

$$LEi(p) = lam / Dy(p) AEi(p) \quad (5.10)$$

$$LE(p) = lam / Dx(p) AE(p). \quad (5.11)$$

Bei einer Randbedingung dritter Art (Wärmeübergang) – das Volumenelement liegt an der Außenfläche des Partikels p – gilt mit dem Wärmeübergangskoeffizienten α_L für die an die Luft im Hohlraum abgegebene Wärme:

$$Q_{j,aus} = \left(\frac{1}{\alpha_L} + \frac{\Delta x}{2 \lambda} \right)^{-1} (t_{i,j,k} - t_L) \Delta x \Delta y \Delta \tau \quad (5.12)$$

$$Q_{k,aus} = \left(\frac{1}{\alpha_L} + \frac{\Delta x}{2 \lambda} \right)^{-1} (t_{i,j,k} - t_L) \Delta x \Delta y \Delta \tau \quad (5.13)$$

$$Q_{i,aus} = \left(\frac{1}{\alpha_L} + \frac{\Delta y}{2 \lambda} \right)^{-1} (t_{i,j,k} - t_L) \Delta x \Delta x \Delta \tau. \quad (5.14)$$

Zur rechentechnischen Vereinfachung werden die Abkürzungen definiert:

$$REi(p) = Dy(p) / 2 / lam \quad (5.15)$$

$$RE(p) = Dx(p) / 2 / lam. \quad (5.16)$$

Die Ermittlung der Wärmemengen erfolgt jeweils für das in der Schicht s befindliche Partikel p und dort für alle Elemente i, j, k .

Hinweis: Der aus einem Volumenelement austretende Wärmestrom ist selbstverständlich identisch dem Wärmestrom, der ins Nachbarelement eintritt. Durch eine entsprechende Rechenorganisation könnte der Berechnungsaufwand stark reduziert werden. Wegen der Unterschiedlichkeit der Nachbarelemente (Randbedingungen) wäre der Organisationsaufwand aber dennoch sehr beachtlich, sodass darauf verzichtet wird.

Schließlich ergibt sich die **Wärmezufuhr an das Volumenelement** während des betrachteten Zeitintervalls zu:

$$Q_E = Q_{i,ein} + Q_{j,ein} + Q_{k,ein} - Q_{i,aus} - Q_{j,aus} - Q_{k,aus}. \quad (5.17)$$

Die **neue Elementtemperatur** am Ende des Zeitintervalls $\Delta \tau$ berechnet sich zu

$$tn_{i,j,k} = t_{i,j,k} + \frac{Q_E}{c m_E} \quad (5.18)$$

bzw. in kompletter Darstellung der Indizierung und in Programmschreibweise mit den Abkürzungen

$$VE(p) = Dx(p) \cdot Dx(p) \cdot Dy(p) \quad \{\text{Volumen des Elementes im Partikel } p\} \quad (5.19)$$

$$CE(p) = VE(p) \cdot \rho \cdot c \quad \{\text{Wärmekapazität des Elementes im Partikel } p\} \quad (5.20)$$

$$tn(s, p, i, j, k) = t(s, p, i, j, k) + QE / CE(p). \quad (5.21)$$

Die Wärmezufuhr an die Luft ergibt sich bei der Betrachtung der Oberflächenelemente, sie wird entsprechend eliminiert. Gleichzeitig erfolgt die Aufsummierung für alle p im jeweiligen Speicherabschnitt s zu $QL(s)$. Im Einzelnen gelten für die betreffenden Rand-Volumenelemente:

$$QL(s) = QL(s) + Q_{iaus} \cdot \xi \quad \{\text{wenn } i = i_{max}\} \quad (5.22)$$

$$QL(s) = QL(s) + Q_{jaus} \cdot \xi \quad \{\text{wenn } j = j_{max}\} \quad (5.23)$$

$$QL(s) = QL(s) + Q_{kaus} \cdot \xi \quad \{\text{wenn } k = k_{max}\}. \quad (5.24)$$

Der Faktor ξ berücksichtigt einerseits die Anzahl gleicher Oberflächen des Partikels p (dies sind nach Bild 3.6 in Verbindung mit Bild 3.4 in der Regel 16 Flächen, für auf der Spiegelebene liegende Volumenelemente in i -Richtung 8 Flächen) und andererseits die Anzahl der Partikel im Speicherabschnitt $ZP(p) / s_{max}$.

Die wärmetechnische Konsequenz der Wärmezufuhr oder -abfuhr an die Luft wird später besprochen.

5.2 Wärmeübergangskoeffizient zwischen Partikel und umströmender Luft

Für die Volumenelemente, deren Oberfläche teilweise an den Hohlraum grenzt, ist die Kenntnis des Wärmeübergangskoeffizienten α_L ($\equiv \alpha_{pL}$) notwendig. Für den umströmten Körper gelten nach [4, 5] für die schrittweise zu bestimmenden Größen in leicht veränderter Programm-schreibweise:

- Luftgeschwindigkeit im Hohlraum

$$w = mL / \rho_M / FF \quad (5.25)$$

mit

mL Luftmassenstrom (wird zu Beginn des Zeitschrittes aus den Eintrittsdaten bestimmt)

ρ_M Dichte des Mediums gemäß "Stoffdaten" für Luft zu Beginn des Zeitschrittes und am jeweiligen Eintritt in den Speicherabschnitt s

FF Hohlraumquerschnitt nach Gl. (3.20)

- Reynoldszahl

$$ReZ = w \cdot d_K / \nu_M \quad (5.26)$$

mit

nyM kinematische Viskosität des Mediums gemäß "Stoffdaten" für Luft zu Beginn des Zeitschrittes und am Eintritt in den Speicherabschnitt s

dK äquivalenter Füllkörperdurchmesser gemäß Eingabe nach Ermittlung aus der Sieblinie

- Nußeltzahl für eine umströmte Kugel

$$\text{NuZ} = 2 + (0,441 \cdot \text{ReZ} \cdot \text{PrM}^{0,667} + \text{ReZ}^{1,6} \cdot \text{PrM}^2 / (27,027 + 66,027 \cdot \text{ReZ}^{-0,1} \cdot (\text{PrM}^{0,667} - 1)))^{0,5} \quad (5.27)$$

mit

PrM Prandtlzahl des Mediums gemäß "Stoffdaten" für Luft zu Beginn des Zeitschrittes und am Eintritt in den Speicherabschnitt s

- Näherungsweise Korrektur der Nußeltzahl für umströmte Würfel

$$\text{NuZ} = 1,6 \cdot \text{NuZ} \quad (5.28)$$

- Wärmeübergangskoeffizient

$$\alpha_{\text{L}} = \text{NuZ} \cdot \lambda_{\text{M}} / d_{\text{K}} \quad (5.29)$$

mit

λ_{M} Wärmeleitfähigkeit des Mediums gemäß "Stoffdaten" für Luft zu Beginn des Zeitschrittes und am Eintritt in den Speicherabschnitt s.

5.3 Stoffgrößen für feuchte Luft

Die Bestimmung der Stoffwerte basiert auf [6]. Die Approximationsgleichungen sind als FUNCTION's formuliert.

Vor dem Aufruf sind die aktuelle Lufttemperatur in °C und die absolute Luftfeuchte in $\text{kg}_{\text{Wasserdampf}}/\text{kg}_{\text{trockene Luft}}$ zu übergeben. Innerhalb der jeweiligen FUNCTION werden diese t, und x genannt.

Der Luftdruck ist programmintern mit $p_{\text{L}} = 100000 \text{ Pa}$ festgelegt. Er kann nur im Listing geändert werden.

Es gelten in leicht veränderter Programmschreibweise:

- Dichte in $\text{kg}_{\text{Gemisch}}/\text{m}^3$

$$\rho_{\text{L}} = (1 + x) / (x + 0,6222) \cdot p_{\text{L}} / (273 + t) / 461,4 \quad (5.30)$$

- Wärmeleitfähigkeit in W/(m K)

$$\text{lamLL} = 0,024178 + 0,00007634878 \cdot t - 0,00000004663859 \cdot t^2 + 0,0000000004612639 \cdot t^3 \quad (5.31)$$

Diese Wärmeleitfähigkeit gilt für trockene Luft beim genannten Druck pL. Sie ist für die Lufttemperatur $< 0^\circ\text{C}$ wegen des geringen Wasserdampfgehaltes hinreichend genau. Ansonsten wird der Wasserdampfgehalt gemäß Mischungsgleichung mit den Volumenanteilen PHI berücksichtigt.

If $t < 0$ Then

$$\text{lamL} = \text{lamLL}$$

Else

$$\text{lamWL} = 0,016976 + 0,000057535 \cdot t + 0,0000001277125 \cdot t^2 - 0,00000000008951228 \cdot t^3$$

$$\text{PHIW} = x / (0,6222 + x)$$

$$\text{lamL} = (1 - \text{PHIW}) \cdot \text{lamLL} + \text{PHIW} \cdot \text{lamWL}$$

End If (5.32)

- Kinematische Viskosität in m^2/s

$$\text{etaLL} = 0,0000172436 + 0,0000000504587 \cdot t - 0,00000000003923361 \cdot t^2 + 0,0000000000004046118 \cdot t^3 \quad (5.33)$$

Diese Größe verkörpert die dynamische Viskosität in Pa s und gilt für trockene Luft beim genannten Druck pL. (Für die kinematische Viskosität gilt $\nu = \eta / \rho$.) Sie ist für die Lufttemperatur $< 0^\circ\text{C}$ wegen des geringen Wasserdampfgehaltes hinreichend genau. Ansonsten wird der Wasserdampfgehalt gemäß Mischungsgleichung mit den Volumenanteilen PHI berücksichtigt.

If $t < 0$ Then

$$\text{nyL} = \text{etaLL} / \rho_{\text{L}}$$

Else

$$\text{etaWL} = 0,0000091435 + 0,0000000281979 \cdot t + 0,00000000004486993 \cdot t^2 - 0,0000000000004928814 \cdot t^3$$

$$\text{PHIW} = x / (0,6222 + x)$$

$$\text{nyL} = ((1 - \text{PHIW}) \cdot \text{etaLL} + \text{PHIW} \cdot \text{etaWL}) / \rho_{\text{L}}$$

End If (5.34)

- Spezifische Wärmekapazität in J/(kg K)

$$\text{cLL} = 1,0065 + 0,000005309587 \cdot t + 0,0000004758596 \cdot t^2 - 0,0000000001136145 \cdot t^3 \quad (5.35)$$

Diese Wärmekapazität gilt für trockene Luft beim genannten Druck pL. Sie ist für die Lufttemperatur $< 0^\circ\text{C}$ wegen des geringen Wasserdampfgehaltes hinreichend genau. Ansonsten wird der Wasserdampfgehalt gemäß Mischungsgleichung mit den Masseanteilen

$$\text{trockene Luft } 1/(1 + x) \quad \text{und} \quad \text{Wasserdampf } x/(1 + x)$$

berücksichtigt.

If $t < 0$ Then

$$\text{cL} = \text{cLL} \cdot 1000$$

Else

$$cWL = 1,863 + 0,0002680862 \cdot t + 0,0000006794704 \cdot t^2 - 0,0000000002641422 \cdot t^3$$

$$cL = (cLL + x \cdot cWL) / (1 + x) \cdot 1000$$

End If

(5.36)

- Die Rückgabe der Größen ins Berechnungsprogramm erfolgt als

$\rho_M \equiv \rho_L$

$\lambda_M \equiv \lambda_L$

$\eta_M \equiv \eta_L$

$c_M \equiv c_L$.

Die spezifische Wärmekapazität wird zur Berechnung der Prandtlzahl verwendet ($Pr = \nu \rho c / \lambda$).

5.4 Zustandsgrößen für feuchte Luft

Der Zustand der feuchten Luft kann durch eine Vielzahl von Parametern beschrieben werden, beispielsweise durch Luftdruck p_L , Temperatur t , absolute Feuchte x , spezifische Enthalpie h , relative Feuchte, Dichte, spezifisches Volumen, Taupunkttemperatur, Feuchtkugeltemperatur.

Im vorliegenden Fall kann man sich auf zwei Varianten beschränken:

- Gegeben: p_L, t, x
 \Rightarrow Bestimmung weiterer relevanter Parameter mit dem Unterprogramm ZUSTAND
- Gegeben: p_L, h, x
 \Rightarrow Bestimmung weiterer relevanter Parameter mit dem Unterprogramm ZUSTANDH

Im Wechselspiel der beiden Unterprogramme ist es möglich, die thermischen und kalorischen Zustandsgrößen zu ermitteln, sodass auch die Wärmebilanz der strömenden Luft mit eventueller Feuchteänderung möglich ist.

Bei der Formulierung der Unterprogramme wird auf [6, 7] Bezug genommen. Sie werden in leicht geänderter Programmschreibweise vorgestellt.

- Unterprogramm ZUSTAND

Der Luftdruck p_L gilt im gesamten Simulationsprogramm, aktuell werden die Größen Lufttemperatur und absolute Luftfeuchte übergeben, die im Unterprogramm t_{stern} und x_{stern} genannt sind. Die ermittelten Größen $p_{histern}$ und h_{stern} werden als relative Feuchte in % und als spezifische Enthalpie in kJ/kg im Hauptprogramm übernommen.

$p_S = PSA(t_{stern})$

$p_W = x_{stern} \cdot p_L / (0,6222 + x_{stern})$

$x_S = 0,6222 \cdot p_S / (p_L - p_S)$

If $p_S - p_W \geq -0,00001$ Then

```

    xW = xstern
    phistern = pW / pS · 100
    deltah = 0
Else
    xW = xS
    If tstern > 0 Then
        deltah = (xstern - xS) · 4,19 · tstern
        phistern = 200      'Luft übersättigt; Wasser flüssig (Tropfen)
    Else
        deltah = (xstern - xS) · (-334 + 2,09 · tstern)
        phistern = 300      'Luft übersättigt; Wasser fest (Eiskristalle)
    End If
End If
hstern = 1,01 · tstern + xW · (2501 + 1,86 · tstern) + deltah

```

(5.37)

Die Verdampfungskurve bzw. Sublimationskurve PSA ist als FUNCTION im Rechenprogramm enthalten (Als Sättigungstemperatur wird tstern als xx übergeben):

'Verdampfungskurve

If 0,01 <= xx And xx <= 100 Then

$$PSA = 611 \cdot \text{Exp}(-0,000191275 + 0,07258 \cdot xx - 0,0002939 \cdot xx^2 + 0,0000009841 \cdot xx^3 - 0,00000000192 \cdot xx^4)$$

'Sublimationskurve

ElseIf -20 <= xx And xx < 0,01 Then

$$PSA = 611 \cdot \text{Exp}(-0,0004909965 + 0,08183197 \cdot xx - 0,0005552967 \cdot xx^2 - 0,00002228376 \cdot xx^3 - 0,0000006211808 \cdot xx^4)$$

End If (5.38)

- Unterprogramm ZUSTANDH

Aktuell werden die Größen spezifische Enthalpie sowie absolute Luftfeuchte übergeben und als hstern und xstern im Unterprogramm verwendet. Die ermittelte Größe tstern wird als Lufttemperatur in °C ins Hauptprogramm übernommen.

```

phistern = 0
hv = hstern
xS = xstern
pS = xstern · pL / (0,6222 + xstern)
If pS > 100 Then
    ttau = TS(pS)
    htau = 1,01 · ttau + xstern · (2501 + 1,86 · ttau)
    If hv < htau Then
        tstern = Int(ttau + 1)
    End If
End If

```

```

Do
    hr = hstern
    tstern = tstern - 1
    pS = PSA(tstern)
    xS = 0,6222 · pS / (pL - pS)
    hstern = 1,01 · tstern + xS · (2501 + 1,86 · tstern)
    If tstern > 0 Then
        hstern = hstern + (xstern - xS) · 4,19 · tstern
    Else
        hstern = hstern + (xstern - xS) · (-334 + 2,09 · tstern)
    End If
    Loop While hv < hstern
    If hv = hr Then
        tstern = tstern + (ttau - tstern) · (hv - hstern) / (htau - hstern)
    Else
        tstern = tstern + (hv - hstern) / (hr - hstern)
    End If
    'Annahme: Kondensation mit der Austrittsfeuchte von 100 %
    hstern = hv
    pS = PSA(tstern)
    xS = 0,6222 · pS / (pL - pS)
    If xS < xstern Then xstern = xS
    phistern = 100
Else
    tstern = (hv - xstern · 2501) / (1,01 + xstern · 1,86)
End If
Else
    tstern = (hv - xstern · 2501) / (1,01 + xstern · 1,86)
End If
If phistern < 100 Then
    pW = xstern · pL / (0,6222 + xstern)
    pS = PSA(tstern)
    phistern = pW / pS · 100
End If

```

(5.39)

Die Verdampfungskurve bzw. Sublimationskurve TS ist wiederum als FUNCTION im Rechenprogramm enthalten (Der Sättigungsdruck pS wird als xx übergeben):

$Y = \text{Log}(xx)$

'Verdampfungskurve

If 611 <= xx And xx <= 101320 Then

$$TS = -63,16113 + 5,36859 \cdot Y + 0,973587 \cdot Y^2 - 0,0738636 \cdot Y^3 + 0,00481832 \cdot Y^4$$

'Sublimationskurve

ElseIf 103 <= xx **And** xx < 611 **Then**

$$TS = -61,125785 + 8,1386 \cdot Y - 0,07422003 \cdot Y^2 + 0,06283721 \cdot Y^3 - 0,0027237063 \cdot Y^4$$

End If (5.40)

5.5 Änderung des Luftzustandes beim Durchströmen des Speichers

Es wird zunächst angenommen, dass die Luftdurchströmung in aufsteigender Speicherabschnittsnummer s – von $s = 1$ bis $s = s_{\max}$ – erfolgt (**Richtung = 1**). Liegen am Eintritt von s die Parameter spezifische Enthalpie $h_L(s)$ und absolute Feuchte $x_L(s)$ vor, dann ergibt sich am Ende von s (\equiv Eintritt von $s + 1$) mit $QL(s)$ (übertragene Wärme im Zeitschritt $D\tau$) die spezifische Enthalpie zu

$$h_L(s + 1) = h_L(s) + QL(s) / D\tau / mL. \quad (5.41)$$

Hinweis: Der Luftdurchgang durch den Speicher wird quasistationär betrachtet, sodass die schrittweise Bilanzierung nach Gl. (5.41) logisch ist. Real existiert jedoch die Luftgeschwindigkeit w_L , die bei der Speicherlänge $Laenge$ eine Transportzeit ($= Laenge / w_L$, z. B. von 8 s) ergibt. Sie wurde in die vorliegende, vereinfachte Modellierung nicht einbezogen.

Mit dem Unterprogramm ZUSTANDH sind zu $h_L(s + 1)$ die Temperatur $t_L(s + 1)$ und die Feuchte $x_L(s + 1)$ bzw. $\phi_L(s + 1)$ bestimmbar. Das Ergebnis kann qualitativ sehr unterschiedlich sein:

- Bei einer Wärmezufuhr bleibt die absolute Luftfeuchte konstant (Bild 5.2a).
- Bei einer Wärmeabfuhr (Luft hat eine höhere Temperatur als der Schotter) ändert sich die absolute Luftfeuchte ebenfalls nicht, solange die Oberflächentemperatur der Partikel über der Taupunkttemperatur der Luft liegt (Bild 5.2b). Bei der pauschalen Ermittlung gemäß Gl. (5.41) bleibt eine möglicherweise vorhandene örtliche Kondensation unerkannt, wenn die mittlere Luftaustrittstemperatur im ungesättigten Gebiet liegt. Dennoch könnten in der Realität einige niedrige Partikeltemperaturen eine Teilkondensation bewirken.
- Wird die Taupunkttemperatur unterschritten, kondensiert Wasserdampf aus der Luft aus. Die genaue Menge wäre nur bestimmbar, wenn die einzelnen Partikeloberflächentemperaturen betrachtet würden und die Lage der Partikel entlang des Luftstromes (innerhalb des Abschnittes s) zugeordnet erfolgte. Dies ist in Anbetracht der praktischen Gegebenheiten nicht sinnvoll. Stattdessen wird nach dem einfachen Modell gemäß Bild 5.2c verfahren.

Wenn $x_{\text{Sättigung}} < x_L(s)$ gilt, wird am Abschnittsende $x_L(s + 1) = x_{\text{Sättigung}}$ gesetzt und die ausfallende Kondensatmenge zu

$$\text{Kondensat}(s) = mL \cdot (x_L(s + 1) - x_L(s)) \quad (5.42)$$

näherungsweise bestimmt. Die im Speicher insgesamt während einer Betriebsstunde ausgeschiedene Kondensatmenge wird durch Summationen über die Intervalle und die Speicherabschnitte unter Beachten der Zeitschrittweite gebildet:

$$\text{Kondensatmenge(BS)} = \text{Kondensatmenge(BS)} + \sum_{\text{BS}} \sum_{s=1}^{s_{\max}} \text{Kondensat}(s) \cdot \text{Dtau}. \quad (5.43)$$

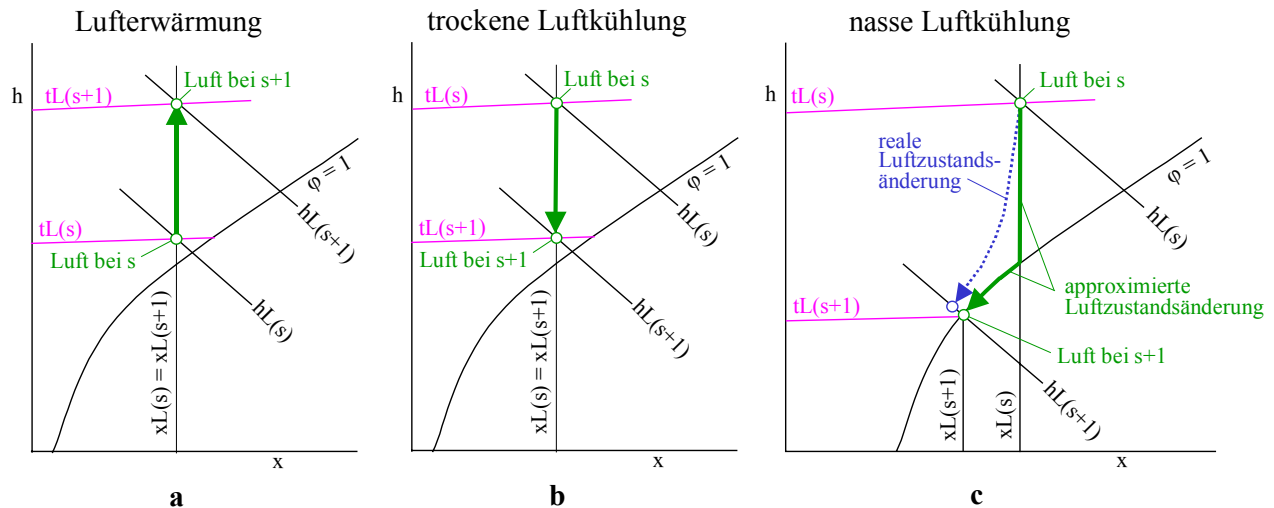


Bild 5.2 Mögliche Luftzustandsänderungen und Approximationen im Simulationsmodell

Bei entgegengesetzter Durchströmrichtung (**Richtung = -1**) gelten die entsprechenden Beziehungen. Zum Lufterintritt s gehört der Luftaustritt $s - 1$, wobei mit $s = s_{\max}$ begonnen wird. Beide Abarbeitungen folgen dem bereits genannten Upwind-Verfahren.

- **Vorbeugung von Instabilitäten**

Bei der Luftdurchströmung kann sich vor allem bei

- sprunghaften Änderungen der Medientemperatur
- großen Speicherabschnittslängen
- großen Zeitschrittweiten
- geringem Luftvolumenstrom

ein instabiler Berechnungszustand einstellen. Dies sei beispielhaft geschildert:

Eine große Wärmemenge gelangt in den den Speicherabschnitt s beaufschlagenden Luftstrom. Am Ende des Zeitschrittes ergibt sich nach Gl. (5.41) und dem Unterprogramm ZUSTANDH eine Lufttemperatur $t_L(s+1)$ die höher liegt als die Temperaturen der angrenzenden Partikeloberflächen. Dies ist ein Verstoß gegen den II. Hauptsatz der Thermodynamik. Diese hohen Temperaturen bewirken im Weiteren einen Wärmestrom in gegensätzlicher Richtung, die Lösungsentwicklung schwingt eine Zeit lang bzw. ist überhaupt nicht konvergent. In diesem Fall kann wegen der zahlreichen Einflüsse kein zu Gl. (3.15) analoges Kriterium formuliert werden.

Deshalb wird folgendermaßen vorgegangen:

Die mittlere Oberflächentemperatur t_{mittel} der Partikel p im Abschnitt s wird näherungsweise bestimmt, indem die Temperatur des "oberen" Volumenelementes $i = 1, j = j_{\text{max}}(p), k = 1$ (siehe Bild 3.5) als Referenztemperatur benutzt wird. Diese "punktuelle" Partikeloberflächentemperatur $t(s, p, 1, j_{\text{max}}(p), 1)$ werde mit dem Anteil der Partikeloberflächen $O_{\text{anteil}}(p)$ gemäß Gl. (3.9) gewichtet. Somit folgt der repräsentative Mittelwert zu:

$$t_{\text{mittel}} = \sum_{p=1}^{p_{\text{max}}} t(s, p, 1, j_{\text{max}}(p), 1) \cdot O_{\text{anteil}}(p). \quad (5.44)$$

Als Stabilitätstest und Gegenmaßnahme für eine möglichst schwingungsfreie numerische Rechnung folgen bei **Richtung = 1**

$$\text{If } QL(s) > 0 \text{ And } tL(s+1) > t_{\text{mittel}} \quad \text{Then} \quad tL(s+1) = t_{\text{mittel}} \quad (5.45)$$

$$\text{If } QL(s) < 0 \text{ And } tL(s+1) < t_{\text{mittel}} \quad \text{Then} \quad tL(s+1) = t_{\text{mittel}} \quad (5.46)$$

und bei **Richtung = -1**

$$\text{If } QL(s) > 0 \text{ And } tL(s-1) > t_{\text{mittel}} \quad \text{Then} \quad tL(s-1) = t_{\text{mittel}} \quad (5.47)$$

$$\text{If } QL(s) < 0 \text{ And } tL(s-1) < t_{\text{mittel}} \quad \text{Then} \quad tL(s-1) = t_{\text{mittel}}. \quad (5.48)$$

Generell sollten die Zeitschrittweiten und/oder die Speicherunterteilungen stets so gewählt werden, dass der vorstehend beschriebene "Noteingriff" vermeidbar ist.

5.6 Sonderfestlegungen bei Stillsand der Luftdurchströmung

Die Ermittlung der Stoffgrößen für feuchte Luft und die des Wärmeübergangskoeffizienten α_{L} nach Gl. (5.29) entfallen, da keine Wärmeübertragung zur Luft erfolgt.

Aus dem gleichen Grund werden auch keine Enthalpiebilanzen aufgestellt und die vorgenannten Stabilitätstests können entfallen.

Während des Luftstillstandes erfolgt – wie bereits zu Beginn des Abschnittes geschildert – lediglich ein Temperatúrausgleich innerhalb jedes Partikels p , ohne auf die Umgebung Bezug zu nehmen.

5.7 Definition der Betriebsstunde

Die Zeitschrittweite D_{tau} bildet das Grundmaß für die Simulation. Eine Simulationsstunde bzw. Betriebsstunde BS entspricht $\text{Intervall}_{\text{max}} \cdot D_{\text{tau}}$. Die Einteilung der Betriebsstunde ist aus Bild 5.3 ersichtlich.

Eine Betriebsstunde beginnt zur vorhergehenden vollen Stunde und endet eine Zeitschrittweite

vor der vollen Zählstunde. Im Programm erfolgt somit die Zuweisung

$$BS = \text{Int}(\tau + 1), \quad (5.49)$$

wobei τ die Simulationsstunde als Dezimale darstellt.

Die Zählweise der Intervalle ist ebenfalls aus Bild 5.3 ersichtlich. Daten am Ende einer Betriebsstunde entsprechen in Wirklichkeit dem zu Intervallmax vorliegenden aktuellen Werten (z. B. Lufteintrittstemperatur, Luftaustrittstemperatur, Speicherwärme usw., bzw. den bis dahin innerhalb der Stunde gebildeten Summengrößen wie beispielsweise die Wärme an den Luftstrom).

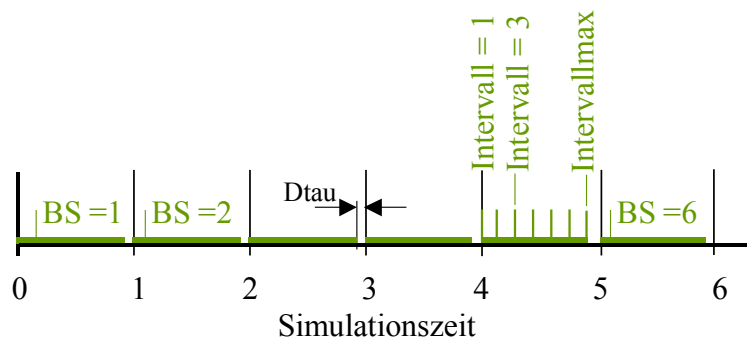


Bild 5.3 Definition und Zählung der Betriebsstunden

Hinweis: Selbstverständlich hätte die Definition der Betriebsstunde auch jeweils an den rechten Vollstundenrand rücken können. Dies wurde aber vermieden, da zu einer vollen Stunde der Eingabewert – beispielsweise die Durchflussrichtung – sprunghaft geändert werden kann. Bei der derzeitigen Festlegung bleibt der Ausgangswert wenigstens eine Stunde konstant erhalten.

6 Grobablauf der Rechenorganisation

Das komplette Listing befindet sich im Anhang. Nachfolgend wird ein Grobablaufplan für die Aktivitäten "Aufbereitung der Eingaben + Datenspeicherung" und "Berechnung" vorgestellt.

	Liegt ein bekanntes Beispiel vor, kann durch DATEI LADEN die Datei " Eingabe.dat " eingelesen und in die Maske 1 [Hauptprogramm] eingetragen werden. Ansonsten erfolgt die individuelle Datenfüllung in Maske 1 durch entsprechenden Zahleneintrag.
	AUFBEREITUNG DER EINGABEN + DATENSPEICHERUNG bewirkt das Einlesen der Maskendaten
	Überprüfung relevanter Eingabedaten wie Hoehe, Breite, rho usw.
	Abarbeitung des Unterprogramms "Berechnung_Basis": Bereitstellung der im Abschnitt 3 beschriebenen Basiswerte, wie z. B. alle Gitterdaten, Volumenelementdaten, Zeitschrittweite, Daten des Gesamtspeichers usw. Speicherung der Eingabedaten und der berechneten Daten in der Datei " Eingabe.dat "
	BERECHNUNG bewirkt das Einlesen aller Eingabedaten " Eingabe.dat " und der Daten für die Entwurfstage " ZVerlauf.dat "

	<p>Abarbeitung des Unterprogramms "Berechnung_Instat" – vorbereitende Arbeiten:</p> <p>Bereitstellung der im Abschnitt 5.1 vorgestellten Terme zur Verkürzung der numerischen Berechnung, wie z. B. Volumenelementflächen, Wärmeleitwiderstände usw.</p> <p>Bereitstellung der Startdaten für die Simulation in Abhängigkeit der Starttemperatur</p> <p>Ist als Speicherstarttemperatur $t_{\text{Start}} = -273$ in Maske 1 vorgegeben, wird die von einer vorherigen Simulation bekannte Datei "Speicherfeld.dat" eingelesen.</p> <p>Nullsetzen der Ergebnisdaten für alle Betriebsstunden ($BS = 0 \dots BS_{\text{max}}$)</p>
L0	<p>Abarbeitung des Unterprogramms "Berechnung_Instat" – Zeitschleife:</p> <p>Ermittlung der Simulationsstunde</p> <p>Ermittlung der Tageszeit (Uhrzeit)</p> <p>Fixierung von vollen Stunden und Anzeige des Simulationsstandes</p> <p>Ermittlung der Betriebsstunde</p> <p>Stundenweise Zählung der Intervalle von 1 bis Intervallmax</p> <p>Bestimmung der aktuellen Temperaturvorgaben aus den thermischen Randbedingungen für den gewählten Entwurfstag durch Interpolation der gespeicherten Zeitverläufe</p> <p>Ermittlung der Luftrichtung</p> <p>Ermittlung der Luftmasse am Eintritt</p> <p>Fixierung der Abarbeitungsgrenzen für die abschnittsweise Speicheruntersuchung in Abhängigkeit der Luftrichtung</p> <p>Wenn $\tau = 0$ (Berechnungsbeginn), Ermittlung der Speicherwärme bezogen auf die Lufteintrittstemperatur und Speicherung der Startwerte</p>
L1	<p>Abarbeitung der instationären Verhältnisse im Speicher in Richtung des Luftstromes</p> <p>Ermittlung der Stoffwerte für Luft in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte</p> <p>Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten</p> <p>Elementweise Ermittlung der Wärmebilanzen nach Berechnung der Wärmeströme über die Begrenzungen der Volumenelemente</p> <p>Berechnung der neuen thermischen Volumenelementzustände am Ende des Zeitintervalls unter Beachten der Speicherkapazität</p> <p>Zuweisung der neuen Temperaturen für spiegelbildliche Volumenelemente</p> <p>Bestimmung der mittleren Partikeloberflächentemperatur im betrachteten Abschnitt s</p> <p>Ermittlung des Luftzustandes (Temperatur, absolute Feuchte) am Ende des Abschnittes s</p> <p>Überprüfung des Stabilitätskriteriums und ggf. Änderung des Luftzustandes</p> <p>Nach Abarbeitung des Abschnittes s erfolgt Rücksprung zu L1</p> <p>Bei Erreichen von $s = s_{\text{max}}$ oder bei Rückwärtsdurchströmung von $s = 1$ weiter ↓</p>
	<p>Wenn der betrachtete Zeitschritt eine volle Stunde markiert (Intervall = Intervallmax), dann Speicherung der im Abschnitt 5 genannten Stundenwerte (z. B. $t_{\text{Lein}}(BS)$, $t_{\text{Laus}}(BS)$, $x_{\text{Lein}}(BS)$, $x_{\text{Laus}}(BS)$ usw.)</p> <p>Die Gesamtwärme an die Luft $Q_{\text{Medium}}(BS)$, die Kondensatmenge(BS) und die im Speicher enthaltene Wärme bezogen auf die Lufteintrittstemperatur $Q_{\text{Speicher}}(BS)$ muss vorher aus den Teilergebnissen der Schichten s und im letzten Fall auch für alle Partikel p ermittelt werden.</p>

	Nach spezieller Steuerung sind auch die Verläufe Lufttemperatur, Luftfeuchte, Partikelkern- und -oberflächentemperatur für jeden Speicherabschnitt s unter " Speicherverlauf.dat " speicherbar.
	Umspeichern des Temperaturfeldes in allen Schichten und Partikeln $t(s, p, i, j, k) = t_n(s, p, i, j, k)$ (zeitliche Endzustände werden zu Anfangswerten für den folgenden Zeitschritt)
	Wenn $BS = BS_{max}$ und Intervall = Intervallmax, Speicherung des letzten Temperaturfeldes unter " Speicherfeld.dat "
	Abarbeitung des nächsten Zeitschrittes Rücksprung zu L0
Speicherung der relevanten Ergebnisse in der Datei " Ergebnis.dat "	

Es können sich anschließen: Druckausgabe und/oder Diagrammdarstellungen in diversen Formen.

7 Anwenderinformation

Luftdurchströmte Schotterspeicher sind bezüglich des eingesetzten Schottermaterials (Partikelgröße und -verteilung) und der thermischen Randbedingungen (Luftvolumenstrom, Lufteintrittstemperatur und -feuchte, veränderliche Durchströmungsrichtung in der Regenerationsphase) sehr variantenreich gestaltbar und betreibbar. In näherungsweise vergleichbaren Programmen (z. B. in [1]) ist die Gitterdarstellung recht kompliziert und erfordert eine umfangreiche Dateneingabe sowie manuelle Vorbereitungen. Dies würde bei den hier vorhandenen Partikelanzahlen p_{max} eine besonders große Arbeit erfordern. Deshalb wurde im Abschnitt 3.2 ein selbsttätig arbeitender Algorithmus erdacht, der die Gittergenerierung vornimmt. Dadurch schwindet die Geometrieingabe auf ein Minimum. Die Dateneingabe kann sich auf nur zwei Masken beschränken:

- Hauptprogramm (Maske 1)
- Zeitverläufe bezogen auf die Entwurfstage (Maske 2).

Das Rechenprogramm ist in **Visual Basic.NET** geschrieben, sollte vorzugsweise in der Programmierumgebung **MICROSOFT VISUALBASIC.NET STANDARD** genutzt werden und stellt für die Datenausgabe in Tabellenform eine Verbindung zu **MICROSOFT WORD** her. Die Diagrammausgabe ist im Programm integriert.

7.1 Datenverwaltung

Bei Betätigen des Buttons **STARTEN** in der Maske "Hauptprogramm" erscheint ein Fenster (Bild 7.1) mit dem Vorschlag einer Pfadangabe einschließlich des Ordners. Diese Angabe kann programmintern geändert werden. Der gewünschte und für das Objekt vorbereitete Pfad und Ordner sind einzugeben. Nach der einmaligen Korrektur werden diese für das Beispiel beibehalten.

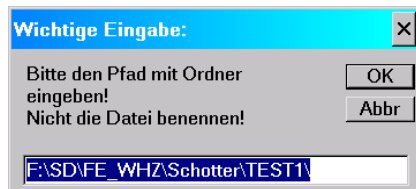


Bild 7.1 Fenster mit Pfad- und Ordnerangabe, die für den jeweiligen Fall anzupassen ist
Sie wird für das gesamte Beispiel beibehalten.

In dem vom Nutzer angelegten Ordner befinden sich – oder werden bei Neueingabe angelegt – die folgenden Dateien:

Eingabe.dat

(Daten des Schotterspeichers gemäß Maske 1 (Bild 7.2, Hauptprogramm) und Daten, die im Unterprogramm "Berechnung_Basis" aus den Originaleingaben ermittelt wurden)

ZVerlauf.dat

(Zeitverläufe der Randbedingungen gemäß Maske 2 (Bild 7.4, Zeitverläufe bezogen auf die Entwurfstage)

Ergebnis.dat

(Ergebnisdaten der Simulation)

Speicherfeld.dat

(Temperaturfeld über alle Speicherabschnitte s und Partikel p als letzter zeitlicher Simulationsstand)

Speicherverlauf.dat

(Verläufe der Lufttemperatur, Luftfeuchte und spezieller Partikeltemperaturen längs des Speichers für alle Abschnitte s zu einer vorher ausgewählten Betriebsstunde in Form einer Sonderausgabe).

Existieren die genannten Dateien noch nicht (Neueingabe), dann werden diese automatisch im definierten Ordner angelegt.

7.2 Eingabe der Speicherdaten

Nachfolgend werden die Eingabedaten erläutert. Bild 7.2 zeigt die Eingabeoberfläche mit den eingetragenen Daten bei einem Neustart.

Die bei der Erläuterung der Eingabedaten (Seite 40) verwendeten Bezeichnungen und Einheiten entsprechen im Allgemeinen den Beschriftungen in der Eingabeoberfläche. Sie unterscheiden sich mitunter von den programmintern verwendeten Größen, die im Listing Verwendung finden. Sie werden zur leichteren Einarbeitung in den Programmcode in der letzten Spalte aufgeführt. Zusätzlich sind die Einheiten bei Abweichungen zur Eingabe vermerkt.

Hauptprogramm

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2007)

Rho kg/m^3 :
 Lambda W/(m K) :
 c J/(kg K) :
 Hohlraumanteil %:
 Äquivalenter Füllkörperdurchmesser mm:

Ausgewählte Partikelgrößen und ihre Verteilung

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volumen in cm^3	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Anteil in %	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Oberflächen-Volumen-Korrelation
 Oberfläche = * Volumen
 Oberfläche in cm^2 und Volumen in cm^3

Daten zum Simulationsablauf

Maximale Anzahl der Simulationsstunden in h:
 Beginn der Simulation (Uhrzeit: 0 ... 23):
 Zeitschrittweite in s (ganzzahlig in 3600 teilbar):
 Luftvolumenstrom in m^3/h (Maximalwert):
 Ausgewählter Entwurfstag (ETagfix: 1 ... 20):
 Starttemperatur in $^\circ\text{C}$ für den gesamten Speicher:
 Bei tStart = 273, Laden einer Temperaturverteilung:

Abläufe:

1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!
2. Daten aus Datei laden oder Neueingabe vornehmen!
3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden!
4. DATENSPEICHERUNG drücken!
5. ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE bzw. ERGEBNISSE oder DIAGRAMM drücken!

Speicherabmessungen

Höhe m:
 Breite m:
 Länge m:
 Anzahl der Längenunterteilungen:

Spezielle Untersuchungen zum Zustand längs des Speichers

Zustand am Ende der Betriebsstunde (Eingabewert > 0):
 Gespeichert werden: Lufttemperatur für alle Speicherabschnitte s
 Abs. Luftfeuchte für alle Speicherabschnitte s
 Spezielle Betrachtung des Partikels (Eingabewert p = 1 ... pmax):
 Gespeichert werden: Temperatur in Partikelmitte $t(s, p, i=1, j=1, k=1)$
 Temperatur an der Partikeloberfläche $t(s, p, i=1, j=pmax, k=1)$
 Speicherung der Ergebnisse in der Datei:
 Diagrammanzeige nach erfolgter Simulation

STARTEN DATEI LADEN AUFBEREITUNG DER EINGABEN + DATENSPEICHERUNG ZEITVERLAUF BERECHNUNG BEENDEN
 DRUCK EINGABEWERTE DRUCK ERGEBNISSE DIAGRAMM

Bild 7.2 Benutzeroberfläche für das Hauptprogramm (Maske 1) zur Simulation eines Schotterspeichers mit der Standarddatenfüllung nach Programmneustart

Mit Hilfe der angeordneten Steuerelemente können alle Eingaben, Berechnungsabläufe und Ausgaben einschließlich der Öffnungen weiterer Bedienflächen ("Fenster") betätigt werden.

Daten des Speichermaterials			
Rho	kg/m^3	Dichte des Schottermaterials (Gestein)	rho
Lambda	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Schottermaterials (Gestein)	lam
c	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität des Schottermaterials (Gestein)	c
Hohlraumanteil	-	Hohlraumanteil der Schotterschüttung	PSI
Äquivalenter Füllkörperdurchmesser	mm	äquivalenter Füllkörperdurchmesser	dK in m
Ausgewählte Partikelgrößen und ihre Verteilung			
Volumen	cm^3	Volumen des Partikels p	V(p)
Anteil	%	Volumenanteil des Partikels p am Gesamtvolumen (\equiv Masseanteil, da alle Partikel gleiche Dichte besitzen)	Anteil(p)

Oberflächen-Volumen-Korrelation

Es sind der Koeffizient und der Exponent für die angegebene Gleichung (3.1) auf der Einheitenbasis cm einzugeben.

Koeffizient	-	Koeffizient (Faktor)	Fak
Exponent	-	Exponent	Exp

Speicherabmessungen

Es sind die Abmessungen zu benennen, die von einer homogenen Luftströmung beaufschlagt werden.

Höhe	m	Höhe der effektiv nutzbaren Schotterschüttung	Hoehe
Breite	m	Breite der effektiv nutzbaren Schotterschüttung	Breite
Länge	m	Länge der effektiv nutzbaren Schotterschüttung	Laenge
Anzahl der Längenunterteilungen	-	Anzahl gleicher Längenabschnitte s bezogen auf die eingegebene Länge	smax

Daten zum Simulationsablauf

Maximale Anzahl der Simulationsstunden	h	Zeitdauer für die die Simulation geführt werden soll	BSmax
Beginn der Simulation	h	Uhrzeit des Simulationsbeginns Es ist eine volle Stunde von 0 ... 23 Uhr einzugeben.	Uhrbeginn
Zeitschrittweite	s	Zeitschrittweite in dem konstante Randbedingungen für die Simulation gelten Der Wert muss in 3600 ganzzahlig enthalten sein. Zur Vereinfachung der Vorgabe wird bei der Aufbereitung der Eingaben ein Vorschlag unterbreitet. Er ist aus DRUCK EINGABEWERTE ersichtlich.	Dtau
Luftvolumenstrom	m ³ /h	maximaler Luftvolumenstrom durch den Schotterspeicher Es handelt sich um einen Maximalwert, der durch den unter Zeitverläufe definierten Faktor VLanteil(BS) reduziert werden kann.	Vh
Ausgewählter Entwurfstag	-	Entwurfstag für den die Simulation erfolgen soll Je nach Wahl der Simulationsstunden werden die für den Entwurfstag geltenden Zeitverläufe fortwährend wiederholt.	ETagfix
Starttemperatur	°C	Starttemperatur für die Simulation Allen Volumenelementen i(p), j(p), k(p) in allen Partikeln p, die sich in allen Speicherschichten s befinden, wird diese Starttemperatur zugewiesen.	tStart

		Es handelt sich um das Temperaturfeld $t(s, p, i, j, k)$. Wird der Eingabewert -273 gewählt, dann wird das Temperaturfeld aus einer vorhandenen Datei gefüllt. Der Pfad und Dateiname sind in der darunter liegenden Box einzugeben. Selbstverständlich muss diese Datei auch vorhanden sein.	
--	--	--	--

Daten zur speziellen Untersuchung längs des Speichers

Betriebsstunde der Speicherbe- trachtung	h	Betriebsstunde an deren Ende der Speicherzustand bestimmt werden soll (Verläufe: Lufttemperatur, Luftfeuchte, Partikelkern- sowie Partikeloberflächentemperatur)	BSTest
Nummer des Testpartikels	-	Partikel, das näher betrachtet werden soll	pTest

Nach dem Ausfüllen der Hauptprogrammmaske könnte dann beispielsweise das Bild 7.3 vorhanden sein.

Hauptprogramm

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2007)

Daten des Speichermaterials

Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Hohlraumanteil %	Äquivalenter Füllkörperdurchmesser mm
2754	2,3	850	44	70,66

Ausgewählte Partikelgrößen und ihre Verteilung

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volumen in cm³	18	87	110	154	221	322	449	606	1150	0
Anteil in %	4,1	6,5	11,1	13,8	25,8	21,2	9,9	5,6	2	0

Oberflächen-Volumen-Korrelation

Oberfläche = 6,8209 * Volumen 0,6552

Oberfläche in cm² und Volumen in cm³

Daten zum Simulationsablauf

Maximale Anzahl der Simulationsstunden in h: 2

Beginn der Simulation (Uhrzeit: 0 ... 23): 18

Zeitschrittweite in s (ganzzahlig in 3600 teilbar): 15

Luftvolumenstrom in m³/h (Maximalwert): 30000

Ausgewählter Entwurfstag (ETagfix: 1 ... 20): 3

Starttemperatur in °C für den gesamten Speicher: 10

Bei tStart = -273, Laden einer Temperaturverteilung:

Abläufe:

1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!
2. Daten aus Datei laden oder Neueingabe vornehmen!
3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden!
4. DATENSPEICHERUNG drücken!
5. ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE bzw. ERGEBNISSE oder DIAGRAMM drücken!

Spezielle Untersuchungen zum Zustand längs des Speichers

Zustand am Ende der Betriebsstunde (Eingabewert > 0): 2

Gespeichert werden: Lufttemperatur für alle Speicherabschnitte s
Abs. Luftfeuchte für alle Speicherabschnitte s

Spezielle Betrachtung des Partikels (Eingabewert p = 1 ... pmax): 7

Gespeichert werden: Temperatur in Partikelmitte $t(s, p, i=1, j=1, k=1)$
Temperatur an der Partikeloberfläche $t(s, p, i=1, j=jmax, k=1)$

Speicherung der Ergebnisse in der Datei:
F:\SD\FE_WHZ\Schotter\TEST1\Speicherverlauf.dat

Diagrammanzeige nach erfolgter Simulation

Buttons: STARTEN, DATEI LADEN, AUFBEREITUNG DER EINGABEN + DATENSPEICHERUNG, ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, BEENDEN, DRUCK ERGEBNISSE, DIAGRAMM

Bild 7.3 Benutzeroberfläche für das Hauptprogramm (Maske 1) mit kompletter, beispielhafter Datenfüllung

Sollen die eingegebenen Werte in der Datei **Eingabe.dat** gespeichert werden, so ist in der Steuerleiste der Bedienoberfläche (Bild 7.3) der Button **AUFBEREITUNG DER EINGABEN + DATENSPEICHERUNG** zu betätigen.

Zur Kontrolle der eingegebenen Größen kann eine komplette Ausgabe der gespeicherten Werte durch Betätigen des Buttons **DRUCK EINGABEWERTE** in einer MS WORD-Datei erzeugt und anschließend ausgedruckt werden. Ein solcher Ausdruck ist in Tabelle 7.1 dargestellt. Nach einer Neueingabe ist der Druck der Eingabewerte natürlich erst nach der erfolgten Datenaufbereitung sinnvoll.

Tabelle 7.1 Komplette Eingaben im Hauptprogramm einschließlich der aufbereiteten Daten als Kontroll-druck

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\TEST1\

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Speicherabmessungen und Luftvolumenstrom:

Höhe m	Breite m	Länge m	Luftvolumenstrom m ³ /h
2,500	10,000	6,500	30000,0

Daten des Speichermaterials:

Rho kg/m ³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Hohlraumanteil %	Äquivalenter Durchmesser mm
2754,0	2,300	850,000	44,0	70,66

Schottervolumen m ³	Schottermasse kg	Luftvolumen m ³
91,00	250614,000	71,50

Partikeldaten:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Partikelvolumina in cm ³									
18,00	87,00	110,00	154,00	221,00	322,00	449,00	606,00	1150,00	0,00
Partikelanteile in %									
4,10	6,50	11,10	13,80	25,80	21,20	9,90	5,60	2,00	0,00
Partikeloberflächen in cm ²									
45,32	127,24	148,38	184,97	234,36	299,91	372,90	453,86	690,58	0,00
Approximierte Partikelquadratseite in cm									
3,53	3,30	3,59	6,93	7,76	5,27	5,94	10,62	12,95	0,00
Approximierte Partikellänge in cm									
1,45	7,99	8,54	3,21	3,67	11,58	12,72	5,37	6,86	0,00
Gesamtvolumen der approximierten Partikel in m ³									
3,73	5,92	10,10	12,56	23,48	19,29	9,01	5,10	1,82	0,00
Anzahl der approximierten Partikel									
207278	67989	91827	81545	106235	59913	20065	8409	1583	0
Anteile der Partikeloberflächen an der Gesamtoberfläche in %									
9,21	8,48	13,36	14,79	24,41	17,61	7,33	3,74	1,07	0,00

Zeitverläufe bezogen auf die Entwurfstage

Zielstellung
☒ Kontrolle bzw. Datenergänzung
☐ Neueingabe der Daten (Datei noch nicht vorhanden)

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname:
 F:\SD\FE_WHZ\Schotter\TEST1\ZVerlauf.dat

WEITER

Entwurfstag: Tagesstunde

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
tL Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes in °C																							
-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273
xL Absolute Luftfeuchte des Luftvolumenstromes in g_Wasser / kg_trockene Luft																							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VLanteil Anteile des Luftvolumenstromes bezogen auf den Maximalwert (Eingabe im Hauptprogramm)																							
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Richtung des Luftvolumenstromes durch den Schotterspeicher (Normalrichtung 1; Gegenrichtung -1; Stillstand 0)																							
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ANZEIGEN drücken! Daten überschreiben (nur Zahlen, Komma, Minuszeichen)!
 DATENSPEICHERUNG drücken!
 Evtl. KONTROLLDRUCK und/oder KONTROLLGRAFIK erzeugen!

ANZEIGEN DATENSPEICHERUNG KONTROLLDRUCK KONTROLLGRAFIK BEENDEN

Bild 7.5 Eingabe- und Bedienoberfläche (Maske 2) für die Zeitverläufe (Tagesgänge) mit einer "neutralen" Startfüllung

Bei einer Neufüllung oder bei einer beabsichtigten Korrektur ist zunächst der Entwurfstag einzugeben. Für diesen werden nach Drücken von **ANZEIGEN** die gespeicherten Daten in den Feldern angezeigt. In beiden Fällen können alle Felder überschrieben werden.

Die in der Maske verwendeten Bezeichnungen sind in der Regel selbsterklärend. Die zugehörigen programminternen Größen werden nachfolgend in der letzten Tabellenspalte vermerkt.

Generell werden alle Größen für die vollen Stunden von 1⁰⁰ bis 24⁰⁰ Uhr angegeben. Intern wird der Wert für 0⁰⁰ Uhr gleich dem für 24⁰⁰ Uhr gesetzt, sodass der jeweilige Tagesgang in rhythmischer Folge für alle Tage der Simulationszeit gilt.

Festlegung des Entwurfstages

Entwurfstag	-	Entwurfstag für den der Zeitverlauf Gültigkeit besitzt Es können 20 verschiedene Entwurfstage vordefiniert werden.	ETag
-------------	---	---	------

24 Stunden-Tagesgänge zur Kennzeichnung des Luftvolumenstromes

tL(ETag, Stunde)	°C	Lufttemperaturverlauf	tLETag(ETag, Stunde)
xL(ETag, Stunde)	g _w /kg _{tL}	Verlauf der absoluten Luftfeuchte	xLETag(ETag, Stunde)
VLanteil(ETag, Stunde)	-	Anteil des Volumenstromes vom Maximalwert	VLanteil(ETag, Stunde)

Richtung(ETag, Stunde)	-	Durchflussrichtung des Luftvolumenstromes	R(ETag, Stunde)
		1 wie aufsteigende s nach Bild 3.7	
		-1 entgegengesetzt zu Bild 3.7	
		0 keine Luftdurchströmung	

Die Datenfüllung ergibt zum Schluss beispielsweise das im Bild 7.6 dargestellte Schema.

Bild 7.6 Benutzeroberfläche für die Zeitverläufe (Maske 2) mit kompletter beispielhafter Datenfüllung für den Entwurfstag 3

Die Aktivierung des Buttons **DATENSPEICHERUNG** aktualisiert den Bestand in der Datei ZVerlauf.dat.

Bei der Datenspeicherung wird programmintern noch das Feld $\phi_{\text{ETag}}(\text{ETag, Stunde})$ mit der jeweils zugehörigen relativen Feuchte gefüllt. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der Datenbasis:

$$t_{\text{LETag}}(\text{ETag, Stunde}); \quad x_{\text{LETag}}(\text{ETag, Stunde}); \quad \text{Luftdruck } p_L = 100000 \text{ Pa.}$$

Es wird dazu das Unterprogramm ZUSTAND nach Gl. (5.37) mit geringen Verkürzungen verwendet.

Nach Angabe des Entwurfstages erfolgt mit **KONTROLLDRUCK** die Erstellung eines MS WORD-Dokumentes gemäß Tabelle 4.2, mit **KONTROLLGRAFIK** können vielgestaltige Diagramme – wie bereits in den Bildern 4.2 bis 4.5 gezeigt – erzeugt werden.

Mit **BEENDEN** kehrt man zum Hauptprogramm (Maske 1) zurück.

Die Verwendung der definierten Zeitverläufe erfolgt unterschiedlich. Die Temperatur- und Feuchteeingaben werden zwischen den Stützstellen linear interpoliert, wie das Bild 7.7a zeigt. Die Richtung des Luftvolumenstromes gilt gemäß Bild 7.7b jeweils bis zur nächsten vollen Stunde (genaugenommen bis einen Zeitschritt davor). Analog wird bei VLanteil(BS) verfahren.

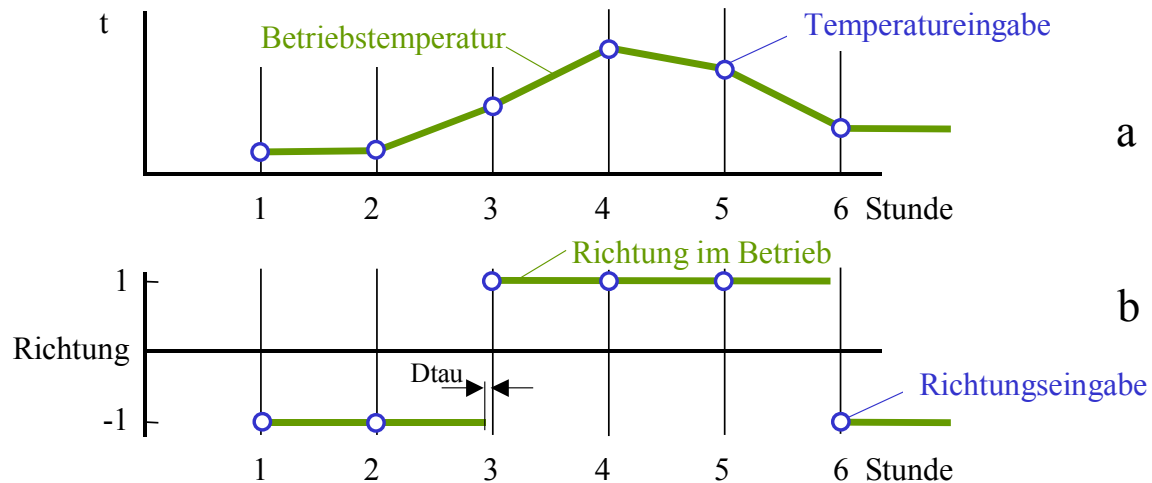


Bild 7.7 Definition der Betriebszustände zwischen den Stützstellen bei der programminternen Nutzung

7.4 Steuerung der Abarbeitungsvarianten

Es bestehen große Variationsmöglichkeiten bei der Abarbeitung **BERECHNUNG**, die zu interessanten Untersuchungen – z. B. Trendanalysen – führen können.

- Am einfachsten gestalten sich **Parametervariationen**, die z. B. durch Änderung der Partikelzusammensetzung, des Hohlraumanteiles, der Speicherlänge usw. zu bewirken sind.
- Besonders aufschlussreich dürften jedoch **Variationen des Betriebsablaufes** sein. So beispielsweise die Wirkung einer Regenerationszeit, der Durchströmungsrichtung, die zeitliche Reduzierung des Luftvolumenstromes usw. Die Ergebnisse könnten zu unterschiedlichen Bewertungen in Abhängigkeit der gewählten Entwurfstage führen u. v. a. m.
- Die Eingabemöglichkeit eines vorhandenen Temperaturfeldes $t(s, p, i, j, k)$ zum Berechnungsstart ermöglicht es, auch **unterschiedliche Entwurfstage** hintereinander zu bearbeiten, sodass spezielle Witterungsperioden untersucht werden können. Ausgehend von einer konstanten Starttemperatur wäre beispielsweise über zwei Tage der Entwurfstag X die relevante Randbedingung. Die automatisch abgespeicherte Temperaturverteilung am Ende der Simulationszeit würde dann die Starttemperaturverteilung bei Simulation des Entwurfstages Y sein usw.
- Schließlich können die **zeitlichen Leistungsverläufe** interessante Aussagen über die sinnvolle Betriebszeit der Schotterspeicher liefern. Hierzu könnte auch der Temperaturverlauf längs des Speichers durch entsprechende Eingabe von BSTest herangezogen werden.

7.5 Programmgrundlagen, Installation und Abarbeitung

Die komplette Darstellung des Berechnungsablaufes – [das Programmlisting](#) – befindet sich im Anhang, und das lauffähige Programm ist auf der beigelegten CD-ROM verfügbar.

Alle Module sind gut strukturiert und mit zahlreichen Kommentaren versehen, sodass eine Einarbeitung rasch möglich ist. Die Programmierung erfolgte in sehr einfacher Form, Anregungen zu eigenen Verbesserungen sind vielfach offensichtlich.

Erfolgt die Programmabarbeitung in der Programmierumgebung [MICROSOFT VISUALBASIC.NET STANDARD](#), sind mögliche Fehlbedienungen und/oder noch vorhandene Programmfehler durch Nutzung des Debuggers relativ leicht auffindbar.

Auf jegliche Spezialsoftware, die einige wesentliche Programmiererleichterungen – beispielsweise bei der Erzeugung von Ausgabetabellen – bewirkt hätte, wurde bewusst verzichtet. Es werden lediglich Verbindungen zu MICROSOFT WORD hergestellt.

[Gliederung des Rechenprogramms:](#)

Form1.vb	Hauptprogramm mit Ablaufsteuerung und Ergebnisausdruck
Form2.vb	Eingabe der Zeitverläufe mit Kontrollausdruck
Form3.vb	Anzeige zum Simulationsstand in Stunden während der Berechnung
Form4.vb	Kontrollgrafik als Zeitverläufe der Eingaben in Abhängigkeit der Entwurfstage und Tagesstunden Ergebnisgrafik in Form von Zeitverläufen für die Austrittstemperatur, Austrittsfeuchte, Speicherenthalpien und Wärmeleistungen in Abhängigkeit eines frei auswählbaren Betriebszeitraumes
Form5.vb	Ergebnisgrafik in Form von Verläufen längs des Speichers für die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Partikelkern- und Partikeloberflächentemperatur

[Grundlagen für die Programmanwendung:](#)

Voraussetzung für die Programmnutzung sind die Betriebssysteme:

[Microsoft Windows 2000 Professional mit Service Pack 4](#) oder

[Microsoft Windows XP mit Service Pack 1](#).

Für beide Betriebssysteme werden zum Ablauf des "Raummodells" zusätzlich maximal zwei Dateien benötigt, die man unter <http://www.microsoft.com/germany/default.aspx> kostenlos downloaden kann.

1. Datei: [Microsoft® .NET Framework Version 1.1 Redistributable Package](#)

Quickinfo	Dateiname:	dotnetfx.exe
	Downloadgröße:	23709 KB
	Veröffentlichungsdatum:	22.05.2003
	Version:	1.1 bzw. 1.1.4322
Die Datei findet man z. B. unter dem Suchbegriff: Net Framework		

2. Datei: [Sprachpaket Deutsch für Microsoft® .NET Framework Version 1.1](#)

Quickinfo	Dateiname:	langpack.exe
	Downloadgröße:	1408 KB
	Veröffentlichungsdatum:	21.05.2003
	Version:	1.1
Die Datei findet man z. B. unter dem Suchbegriff: Net Sprachpaket Das Sprachpaket enthält deutsche Texte, z.B. Fehlermeldungen.		

[Start des Rechenprogramms:](#)

Die übergebenen Dateien sind in ein eigenes Verzeichnis auf die Festplatte zu schreiben. Das Programm z. B. in den Ordner **SPEICHER**.

Für die Beispiele bzw. Nutzrechnungen werden die Ordner **TEST1**, **TEST2** usw. mit den entsprechenden Dateien angelegt.

Abarbeitung ohne Entwicklungsumgebung:

Ordner **"SPEICHER"** öffnen ⇒ Datei **"bin"** öffnen ⇒ **"Schotterspeicher.exe"** Doppelklick

Abarbeitung mit Entwicklungsumgebung:

Visual Basic.NET starten ⇒ Menüleiste **"Datei"** ⇒ **"Öffnen"** ⇒ **"Projekt"** Einfachklick
 ⇒ Ordner **"SPEICHER"** auswählen ⇒ **"Schotterspeicher.sin"** Doppelklick
 ⇒ Menüleiste **"Debuggen"** Einfachklick ⇒ **"Starten"** Einfachklick

Zu Beginn wird in einem Fenster (Bild 7.1) ein Pfad für das zu bearbeitende Beispiel angegeben. Dieser Vorschlag ist in der Regel mit dem selbst gewählten Pfad zu überschreiben!

[Bearbeitung des Programmlistings:](#)

Im Ordner **"SPEICHER"** sind alle Dateien mit den Quellcodes (Form 1 bis 5: Formulare für die Benutzeroberflächen und Programmcodes) enthalten (Auswahl mit Hilfe des Projektmappen-Explorers).

7.6 Ausgaben

Die Zusammenstellungen der Eingabewerte sowie der Ergebnisse werden als MS WORD-Dateien angezeigt. Sie können individuell geändert, gespeichert und ausgedruckt werden. Die Ausgaben sind selbsterklärend und anhand der Testbeispiele ersichtlich. Zusätzlich ist eine umfangreiche Grafikausgabe möglich.

Die entsprechenden Ausgabebutts **DRUCK EINGABEWERTE** bzw. Anzeigebutts **DIA-GRAMM** sind im Hauptprogramm (Maske 1) unter den Butts **AUFBEREITUNG DER EINGABEN** und **BERECHNUNG** angeordnet. Damit soll optisch darauf hingewiesen werden, dass die in der oberen Zeile stehenden Aktivitäten erst zu erfüllen sind.

Zur Grafikausgabe kann man von der Maske 1 aus durch die Betätigung des Butts **DIA-GRAMM** gelangen. Da das gleiche Unterprogramm auch über den **KONTROLLAUSDRUCK** von der Maske 2 aus erreichbar ist, wäre prinzipiell auch dieser Weg denkbar. Die Grundform des Diagramms ist im Bild 7.8 dargestellt.

Bild 7.8 Grundform des Diagrammaufbaues zur variablen Darstellung von Eingabedaten und von Ergebnissen der Simulation

Der Hintergrund ist weiß, damit die Farbdarstellungen besser wirken. Es können gemäß der Buttonbeschriftungen dargestellt werden:

- Tagesgänge für alle Entwurfstage

- Betriebsverläufe der Lufteintritts- und Luftaustrittszustände für das Simulationsbeispiel

- Wärmestrom- und Speicherzustandsverläufe für das Simulationsbeispiel.

Die Auswahl ist anhand der CHECKBOXEN zu treffen. Die farblichen Kurvendarstellungen stimmen mit den Beschreibungen überein. Es können maximal sechs Verläufe ausgewählt und gleichzeitig dargestellt werden.

Zum Zeigen der Tagesgänge ist zuerst der Entwurfstag einzutragen. Falls dies unterlassen wurde, erfolgt der Ausdruck nach Bild 7.9. Das Diagramm wird nach der Buttonbetätigung **Tagesgänge-Entwurfstage** gezeichnet.

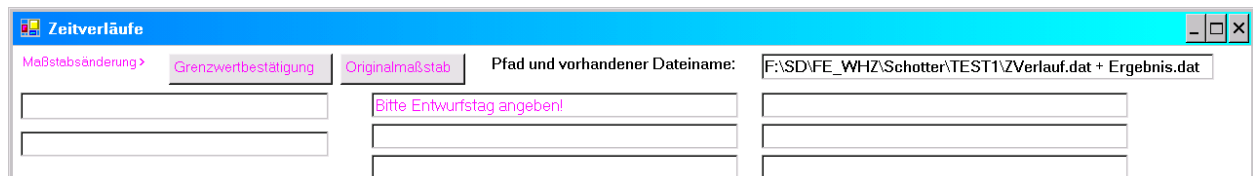


Bild 7.9 Diagramm zur Ausgabe der Tagesgänge mit Hinweis auf die fehlende Angabe des Entwurfstages
Nach ordnungsgemäßer Eingabe des Entwurfstages erfolgt die Ausgabe nach Bild 7.10.

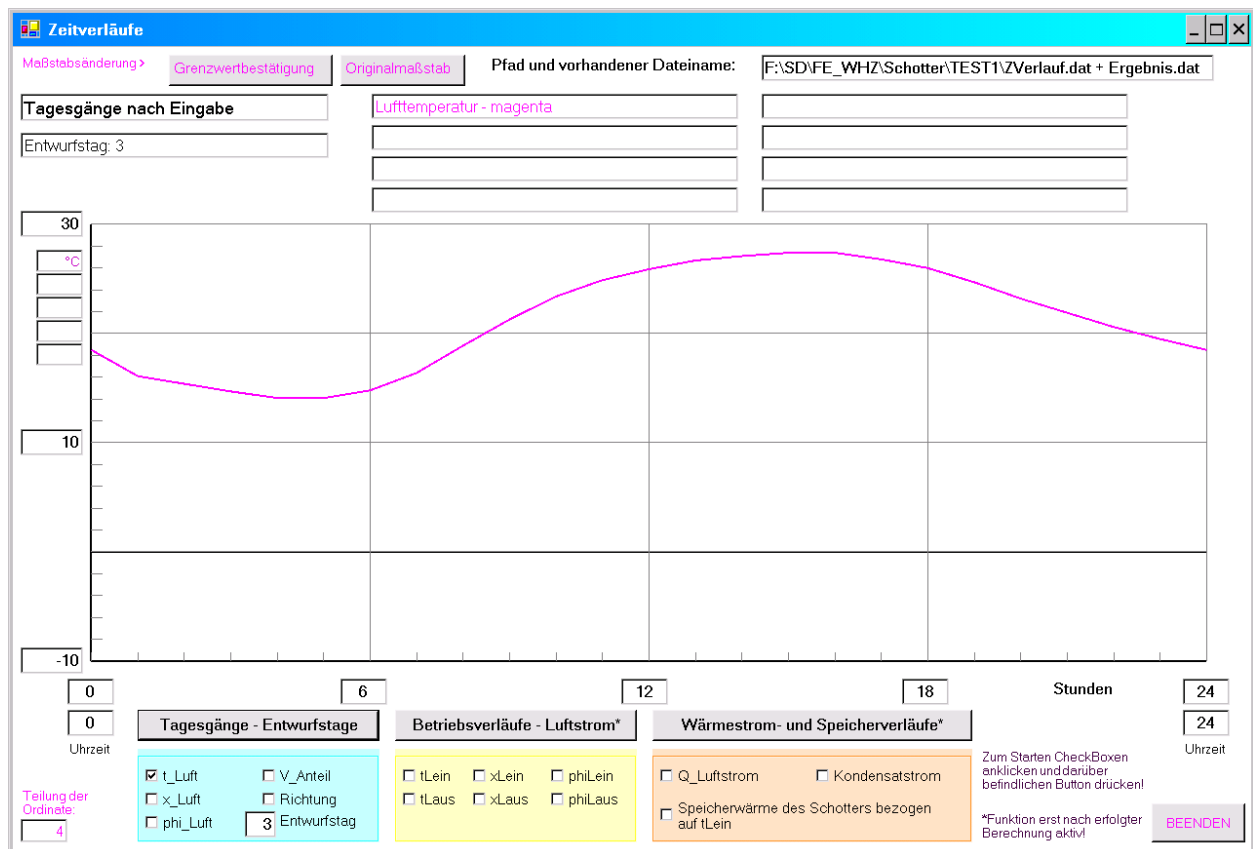


Bild 7.10 Diagramm mit dem Lufttemperaturverlauf für Entwurfstag 3 gemäß der programmintern gewählten Voreinstellung für die Achsen

Die Zeitachse (Abszisse) ist bei dieser Darstellung (Tagesgang) fest definiert ($0^{00} \dots 24^{00}$ Uhr), die Temperaturachse (Ordinate) kann aber durch Überschreiben der Grenzwerte, dem Drücken des Buttons **Grenzwertbestätigung** und erneuter Betätigung **Tagesgänge-Entwurfstage** beliebig

verändert werden. Gleiches gilt für die Achsteilung, die ebenfalls wählbar ist, sodass gut ablesbare Darstellungen entstehen. Zwischen den Hauptunterteilungen werden automatisch fünf Subunterteilungen mit kurzen Achsstrichen gestaltet. Das Ergebnis einer möglichen Änderung zeigt Bild 7.11. Will man die voreingestellte Achsteilung wieder herstellen, dann sind **Originalmaßstab** und danach **Tagesgänge-Entwurfstage** zu drücken.

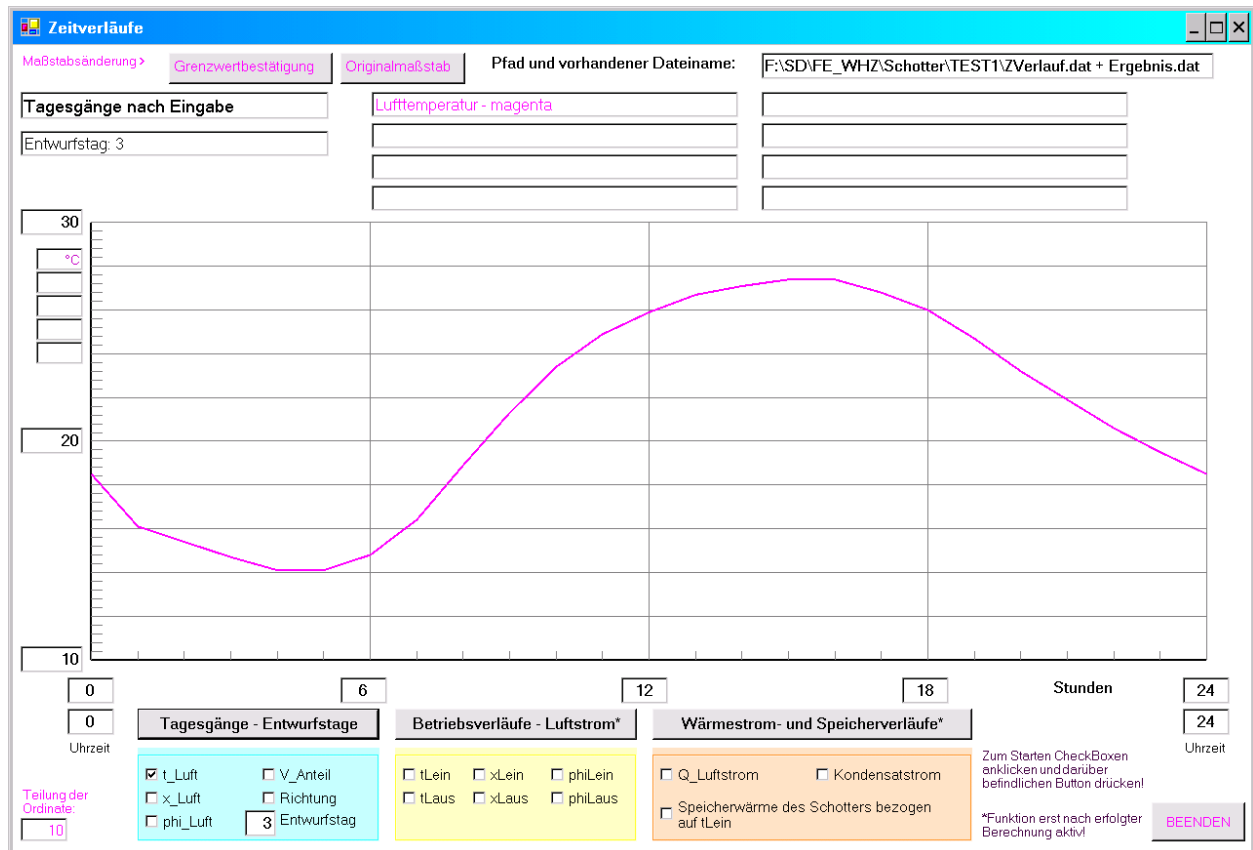


Bild 7.11 Diagramm mit dem Lufttemperaturverlauf für Entwurfstag 3 nach einer veränderten Achseinteilung gegenüber Bild 7.10

Bei den Ergebnisdarstellungen kann auch die Abszisseneinteilung geändert werden. Generell wird auf eventuelle Falscheingaben hingewiesen (Bild 7.12).

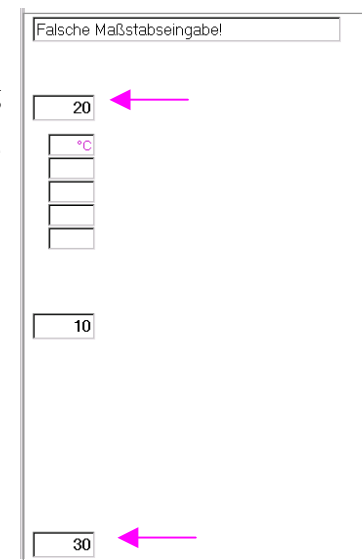


Bild 7.12 Diagramm mit Hinweis auf eine fehlerhafte Achseinteilung

Die Darstellung der **Betriebsverläufe-Luftstrom** sowie der **Wärmestrom- und Speicherverläufe** erfolgt analog, wobei auch die Abszissendarstellung individuell gestaltbar ist.

8 Detailüberprüfung des Algorithmus "Berechnung_Instat"

Im Weiteren wird der Algorithmus schrittweise durchgegangen und die Überprüfung der Berechnungsschritte kontrolliert. Als Grundlage dient generell das Beispiel TEST1, zur Vereinfachung werden mitunter aber auch spezielle Eingangsgrößen gesetzt.

8.1 Zusammenstellung der Elementdaten

Gemäß Tabelle 3.3 "Ursprüngliche und aufbereitete Eingabedaten" gilt:

Daten des Speichermaterials:

Rho kg/m ³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Hohlraumanteil %	Äquivalenter Durchmesser mm
2754,0	2,300	850,000	44,0	70,66

Gitterdarstellung der Partikel und Ermittlung des maximalen Zeitschrittes:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Unterteilung der halben Quadratseite: Dx(p) in cm									
Maximale Gitternummer: jmax(p) = kmax(p)									
1,76	1,65	1,79	1,16	1,29	1,32	1,49	1,06	1,08	0,00
1	1	1	3	3	2	2	5	6	0
Unterteilung der halben Quaderlänge: Dy(p) in cm									
Maximale Gitternummer: imax(p)									
0,72	1,33	1,07	1,60	1,84	1,16	1,06	1,34	1,14	0,00
1	3	4	1	1	5	6	2	3	0

Nach der Berechnung des Simulationsmodells ergeben sich mit der eingegebenen Zeitschrittweite $D\tau = 15$ s für das Partikel $p = 5$:

$Dx(p) = 0.01293334$	Single ✓
$Dy(p) = 0.01835009$	Single ✓
$D\tau = 15$	Integer ✓
$AEi(p) = 0.00250906916$	Single ✓
$AE(p) = 0.00355991954$	Single ✓
$VE(p) = 0.00000306944321$	Single ✓
$CE(p) = 7.18526$	Single ✓
$REi(p) = 0.00398915028$	Single ✓
$RE(p) = 0.0028115958$	Single ✓
$LEi(p) = 0.314486682$	Single ✓
$LE(p) = 0.633078158$	Single ✓

Berechnungen und Zuordnung der Werte
sind richtig!

8.2 Füllen der Starttemperatur

Zunächst wird ein vorgegebener, konstanter Startwert (10 °C) allen Volumenelementen zugeord-

net. Die stichprobenweise Kontrolle liefert:

$t(1,1,1,1,1) = 10.0$ Single ✓

$t(5,3,1,1,1) = 10.0$ Single ✓

$t(100,9,2,4,6) = 10.0$ Single ✓

Die Zuordnung der konstanten Starttemperatur erfolgt korrekt!

Im Weiteren werde die Füllung einer bekannten Temperaturverteilung aus der Datei "Speicherfeld.dat" überprüft. Die Datei entsteht am Ende einer Simulation. Es gelten beispielsweise die nachfolgenden Referenzwerte:

$t(1,1,1,1,1) = 23.36272$ Single

$t(5,3,1,1,1) = 23.77601$ Single

$t(100,9,2,4,6) = 10.78473$ Single.

Wenn der Neustart beispielsweise mit $t_{\text{Start}} = -273$ erfolgt (siehe Maskenauszug), werde die bekannte Datei eingelesen.

The screenshot shows a software interface with three main sections. The left section, titled 'Starttemperatur in °C für den gesamten Speicher', has a text box containing '-273' and a button 'Bei tStart = -273, Laden einer Temperaturverteilung:'. Below this is a text box with the file path 'F:\SD\FE_WHZ\Schotter\TEST1\Speicherfeld.dat'. The middle section, titled '5. ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE bzw. ERGEBNISSE oder DIAGRAMM drücken!', contains a button 'Diagrammanzeige nach erfolgter Simulation'. The right section, titled 'Speicherung der Ergebnisse in der Datei:', has a text box with the file path 'F:\SD\FE_WHZ\Schotter\TEST1\Speicherverlauf.dat' and a button 'Diagrammanzeige nach erfolgter Simulation'.

Die Kontrolle der Temperaturzuordnung liefert:

$t(1,1,1,1,1) = 23.36272$ Single ✓

$t(5,3,1,1,1) = 23.77601$ Single ✓

$t(100,9,2,4,6) = 10.78473$ Single ✓

Die Zuordnung der Starttemperaturverteilung gemäß Datei erfolgt korrekt!

8.3 Ermittlung der Zeiten bei Beginn der Zeitschleife

Zunächst ergeben sich mit $D_{\text{tau}} = 15$ s und einer maximalen Simulationszeit von $B_{\text{Smax}} = 2$ h die Eingangsdaten:

Zeitmax = 480 Integer ✓

Intervallmax = 240 Integer ✓

Nach Beginn der Zeitschleife gelten bei Zeit = 0 und nach Festlegung des Intervalls:

Zeit = 0 Integer ✓

tau = 0.0 Single ✓

tauUhr = 18.0 Single ✓

GanzeStunde = 1 Integer ✓

BS = 1 Integer ✓

Stunde = 18 Integer ✓ ⇒ Bezugszeit für die Interpolation für tLa, xLa

Stunde1 = 19 Integer ✓ ⇒ Bezugszeit für die Interpolation für tLa, xLa

Intervall = 1 Integer ✓

Im nächsten Zeitschritt gelten:

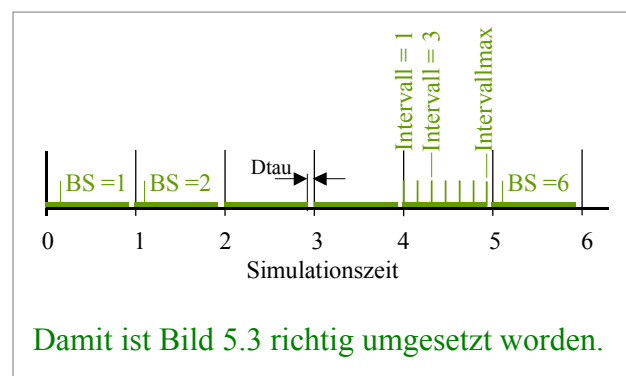
Zeit	= 1	Integer ✓
tau	= 0.004166667	Single ✓
tauUhr	= 18.0041676	Single ✓
GanzeStunde	= 0	Integer ✓
BS	= 1	Integer ✓
Stunde	= 18	Integer ✓
Stunde1	= 19	Integer ✓
Intervall	= 2	Integer ✓

Bei Intervallmax folgen:

Zeit	= 239	Integer ✓	
tau	= 0.995833337	Single ✓	⇒ 15 s vor der vollen Stunde
tauUhr	= 18.9958324	Single ✓	⇒ 15 s vor 19 ⁰⁰ Uhr
GanzeStunde	= 0	Integer ✓	⇒ noch keine volle Stunde
BS	= 1	Integer ✓	⇒ es gilt noch die erste Betriebsstunde
Stunde	= 18	Integer ✓	⇒ Bezugszeit für die Interpolation für tLa, xLa
Stunde1	= 19	Integer ✓	⇒ Bezugszeit für die Interpolation für tLa, xLa
Intervall	= 240	Integer ✓	⇒ Letztes Berechnungsintervall innerhalb BS = 1

Im darauffolgenden Zeitschritt gelten folgerichtig:

Zeit	= 240	Integer ✓
tau	= 1.0	Single ✓
tauUhr	= 19.0	Single ✓
GanzeStunde	= 1	Integer ✓
BS	= 2	Integer ✓
Stunde	= 19	Integer ✓
Stunde1	= 20	Integer ✓
Intervall	= 1	Integer ✓



8.4 Ermittlung des Lufteintrittszustandes

Zu Beginn der Simulation (BS = 1) liegt der nachfolgende Lufteintrittszustand vor.

tauUhr	= 18.0	Single ✓	
Stunde	= 18	Integer ✓	
Stunde1	= 19	Integer ✓	
tLa	= 26.0	Single ✓	⇒ gemäß Tabelle 4.2

(*)

xLa	= 0.0086	Single ✓ \Rightarrow gemäß Tabelle 4.2	(**)
phiein	= 40.57453	Single ✓ \Rightarrow gemäß h,x-Diagramm [6]	(***)
hein	= 48.1844978	Single ✓ \Rightarrow gemäß h,x-Diagramm [6]	(****)
vein	= 0.87024283	Single ✓ \Rightarrow gemäß h,x-Diagramm [6]	
mLmax	= 9.575871	Single ✓ \Rightarrow für $V_h = 30000 \text{ m}^3/\text{h}$ und $V_h / 3600 / \text{vein}$	
mL	= 9.575871	Single ✓ \Rightarrow da $V_{L\text{anteil}}(\text{BS}) = 1$	(°)

Nach ca. 0,5 Stunden gelten die Bedingungen:

Intervall	= 121	Integer ✓	
tauUhr	= 18.4958324	Single ✓	
Stunde	= 18	Integer ✓	
Stunde1	= 19	Integer ✓	
tLa	= 25.3554173	Single ✓ \Rightarrow \approx Mittelwert aus 26,0 und 24,7 nach Tabelle 4.2	
xLa	= 0.00869916	Single ✓ \Rightarrow \approx Mittelwert aus 8,6 und 8,8 nach Tabelle 4.2	

Zu Beginn der BS = 2 ergeben sich:

Intervall	= 1	Integer ✓	
tauUhr	= 19.0	Single ✓	
Stunde	= 19	Integer ✓	
Stunde1	= 20	Integer ✓	
tLa	= 24.7	Single ✓ \Rightarrow gemäß Tabelle 4.2	
xLa	= 0.0088	Single ✓ \Rightarrow gemäß Tabelle 4.2	

Die Lufteintrittszustände werden korrekt ermittelt!

Die Eintrittsdaten sind für die Speichersimulation entsprechend dem Luftdurchgang zuzuordnen.

Zu Beginn der BS = 1 gelten:

tauUhr	= 18.0	Single ✓	
BS	= 1	Integer ✓	
Richtung	= 1	Integer ✓ \Rightarrow gemäß Eingabe	
sBeginn	= 1	Integer ✓ \Rightarrow entsprechend Richtung = 1	
sEnde	= 100	Integer ✓ \Rightarrow entsprechend Richtung = 1	
sStep	= 1	Integer ✓ \Rightarrow entsprechend Richtung = 1	
tL(1)	= 26.0	Single ✓ \Rightarrow entsprechend Gl. (*)	
xL(1)	= 0.0086	Single ✓ \Rightarrow entsprechend Gl. (**)	
phiL(1)	= 40.57453	Single ✓ \Rightarrow entsprechend Gl. (***)	
hL(1)	= 48.1844978	Single ✓ \Rightarrow entsprechend Gl. (****)	

8.5 Ermittlung des Speicherzustandes zu Beginn der Simulation

Zu Beginn der Simulation (BS = 1) weisen alle Partikel die Temperatur von 10 °C auf. Bezogen auf die Lufteintrittstemperatur von 26,0 °C ergibt sich die Speicherwärme zu:

$$\tau_{\text{Uhr}} = 18.0 \quad \text{Single} \checkmark$$

$$Q_{\text{Speicher}}(0) = -3.40838886\text{E}+9 \quad \text{Single} \checkmark \Rightarrow \text{Angabe in Ws; } \equiv -946,8 \text{ kWh} \checkmark$$

Kontrollrechnung :

$$m_{\text{Speicher}} c (t_{\text{Start}} - t_{\text{Lein}}) = 250614 \cdot 850 \cdot (10 - 26) / 3600000 \text{ kWh} = -946,8 \text{ kWh}.$$

8.6 Ermittlung der Stoffwerte für feuchte Luft

Um die Ergebnisse mit bekannten Werten gut vergleichen zu können, wird als Lufttemperatur 20 °C und als absolute Luftfeuchte 10 g_w/kg_{tL} verwendet. Es folgen:

$$\rho_{\text{M}} = 1.18173921 \quad \text{Single} \checkmark \Rightarrow \text{Übereinstimmung mit [6]}$$

$$c_{\text{M}} = 1015.32867 \quad \text{Single} \checkmark \Rightarrow \text{Übereinstimmung mit [6]}$$

$$n_{\text{yM}} = 0.0000153187411 \quad \text{Single} \checkmark \Rightarrow \text{Übereinstimmung mit [6]}$$

$$\lambda_{\text{M}} = 0.0255679041 \quad \text{Single} \checkmark \Rightarrow \text{Übereinstimmung mit [6]}$$

$$Pr_{\text{M}} = 0.718879759 \quad \text{Single} \checkmark \Rightarrow \text{Übereinstimmung mit [6]}$$

8.7 Überprüfung des Wärmeübergangskoeffizienten

Die Berechnung erfolgt wieder mit den Originalwerten für TEST1 zu Beginn der BS = 1:

$$m_{\text{L}} = 9.575871 \quad \text{Single} \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (°)}$$

$$\rho_{\text{M}} = 1.15898681 \quad \text{Single}$$

$$n_{\text{yM}} = 0.000015886415 \quad \text{Single}$$

$$\lambda_{\text{M}} = 0.02602906 \quad \text{Single}$$

$$Pr_{\text{M}} = 0.7174983 \quad \text{Single}$$

$$w = 0.7511162 \quad \text{Single} \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.25)}$$

$$Re_{\text{Z}} = 3340.834 \quad \text{Single} \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.26)}$$

$$Nu_{\text{Z}} = 68.75158 \quad \text{Single} \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gln. (5.27) und (5.28)}$$

$$\alpha_{\text{pAL}} = 25.32606 \quad \text{Single} \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.29)}$$

8.8 Überprüfung der Wärmetransportvorgänge am und im Partikel

Zunächst wird der Wärmeübergang von den außenliegenden Volumenelementen an die Luft im Hohlraum untersucht. Zu Beginn der Simulation ($\tau = 0$) haben diese Elemente die Temperatur 10 °C und am Eintritt in den Speicher ($s = 1$) besitzt die Luft die Temperatur 26 °C. Die Berechnungen an verschiedenen Oberflächen des Partikels $p = 5$ ergeben:

Volumenelement mit einer Außenfläche

$i = 1 (\equiv \text{imax}(5)); j = 1 \dots \text{jmax}(5) - 1; k = 1 \dots \text{kmax}(5) - 1$

$$Q_{\text{iein}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.6)}$$

$$Q_{\text{iaus}} = -0.9234243 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.14)}$$

Kontrolle:

$$Q_{\text{iaus}} = \left(\frac{1}{25,32606} + \frac{0,01835009}{2 \cdot 2,3} \right)^{-1} (10 - 26) 0,01293334^2 \cdot 15 \text{ Ws} = -0,923424 \text{ Ws}$$

$$Q_{\text{jein}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.2)}$$

$$Q_{\text{jaus}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.3)}$$

$$Q_{\text{kein}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.4)}$$

$$Q_{\text{kaus}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.5)}$$

$$Q_E = 0.9234243 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.17)}$$

Volumenelement mit zwei Außenflächen

$i = 1 (\equiv \text{imax}(5)); j = \text{jmax}(5); k = 1 \dots \text{kmax}(5) - 1$

$$Q_{\text{iein}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.6)}$$

$$Q_{\text{iaus}} = -0.9234243 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.14)}$$

$$Q_{\text{jein}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.2)}$$

$$Q_{\text{jaus}} = -1.3466494 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.12)}$$

Kontrolle:

$$Q_{\text{jaus}} = \left(\frac{1}{25,32606} + \frac{0,01293334}{2 \cdot 2,3} \right)^{-1} (10 - 26) 0,01293334 \cdot 0,01835009 \cdot 15 \text{ Ws} = -1,346649 \text{ Ws}$$

$$Q_{\text{kein}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.4)}$$

$$Q_{\text{kaus}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.5)}$$

$$Q_E = 2.27007365 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.17)}$$

Volumenelement mit drei Außenflächen

$i = 1 (\equiv \text{imax}(5)); j = \text{jmax}(5); k = \text{kmax}(5)$

$$Q_{\text{iein}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.6)}$$

$$Q_{\text{iaus}} = -0.9234243 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.14)}$$

$$Q_{\text{jein}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.2)}$$

$$Q_{\text{jaus}} = -1.3466494 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.12)}$$

$$Q_{\text{kein}} = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.4)}$$

$$Q_{\text{kaus}} = -1.3466494 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.13)}$$

$$Q_E = 3.616723 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.17)}$$

Der Wärmestrom zwischen den Volumenelementen im Inneren des Partikels war bisher null, da alle Elemente die Temperatur von 10 °C besaßen. Zur Kontrolle der Wärmeleitung muss deshalb auf einen späteren Zeitpunkt gegangen werden. Es gelte die Uhrzeit 19⁰⁰ Uhr. Des Weiteren sei im Abschnitt $s = 1$ das Partikel $p = 9$ betrachtet, wobei $i = 2$; $j = 5$; $k = 3$ gelten, um ein Volumenelement mit reiner Wärmeleitung zu den Nachbarelementen zu betrachten. Es folgen:

$$Q_{\text{iein}} = -0.0223332755 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.6)}$$

$$Q_{\text{iaus}} = -0.0432432927 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.7)}$$

$$Q_{\text{jcin}} = -0.04857934 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.2)}$$

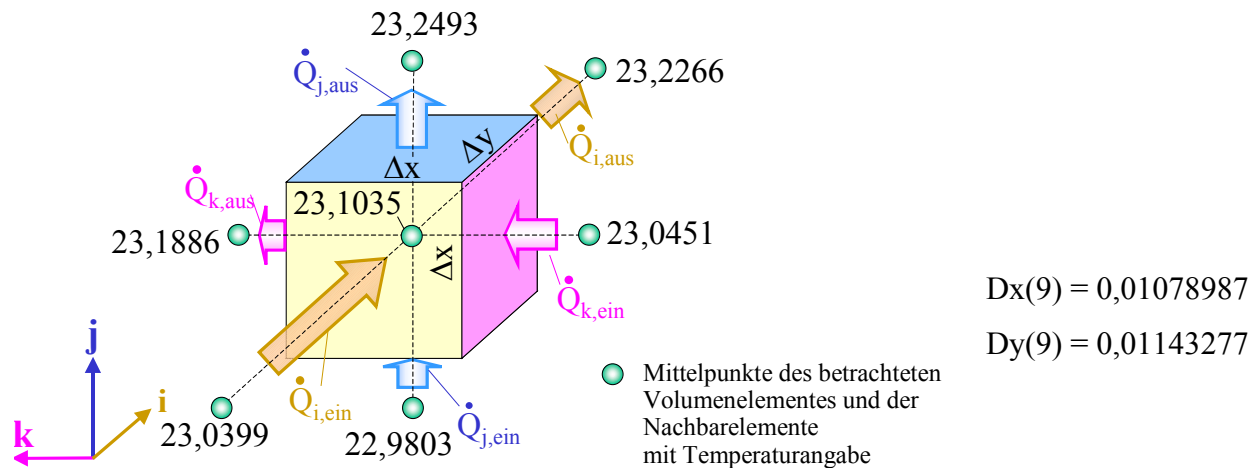
$$Q_{\text{jcaus}} = -0.05748827 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.3)}$$

$$Q_{\text{kcin}} = -0.02301863 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.4)}$$

$$Q_{\text{kcaus}} = -0.03356009 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.5)}$$

$$Q_E = 0.040360406 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.17)}$$

Die Temperaturen der Nachbarelemente sind in der nachfolgenden Skizze vermerkt.



Mit den angegebenen Temperaturen und den Gln. (5.2) bis (5.11) unter Beachten der Abkürzungen

$$LE_i(9) = 0,351317734$$

$$LE(9) = 0,394430548$$

können die **Kontrollrechnungen** durchgeführt werden:

$$Q_{\text{iein}} = 0,351317734 (23,0399 - 23,1035) \text{ Ws} = -0,0223 \text{ Ws}$$

$$Q_{\text{iaus}} = 0,351317734 (23,1035 - 23,2266) \text{ Ws} = -0,0432 \text{ Ws}$$

$$Q_{\text{jcin}} = 0,394430548 (22,9803 - 23,1035) \text{ Ws} = -0,0486 \text{ Ws}$$

$$Q_{\text{jcaus}} = 0,394430548 (23,1035 - 23,2493) \text{ Ws} = -0,0575 \text{ Ws}$$

$$Q_{\text{kcin}} = 0,394430548 (23,0451 - 23,1035) \text{ Ws} = -0,0230 \text{ Ws}$$

$$Q_{\text{kcaus}} = 0,394430548 (23,1035 - 23,1886) \text{ Ws} = -0,0336 \text{ Ws}$$

Die ins Volumenelement gegangene Wärme entspricht nach Gl. (5.17) somit

$$Q_E = 0,0404 \text{ Ws.}$$

Schließlich folgt nach der Temperaturerhöhung im Volumenelement die neue Temperatur zu:

$$t_n(1,9,2,5,3) = 23.1164551 \text{ Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.18)}$$

Kontrolle:

$$t_n(1,9,2,5,3) = 23.1035 \text{ °C} + 0,040 / (850 \cdot 2754 \cdot 0,01078987^2 \cdot 0,01143277) \text{ K} = 23,1165 \text{ °C.}$$

Schließlich ergeben sich alle neuen Feldtemperaturen im j,k-Querschnitt in der Ebene i = 2 zur Zeit 19⁰⁰ Uhr in °C {t_n(1, 9, 2, j = 1... 6, k = 1 ... 6)}:

j	k = 6	k = 5	k = 4	k = 3	k = 2	k = 1
6	23,5510	23,4354	23,3373	23,2606	23,2080	23,1812
5	23,4354	23,3083	23,2006	23,1165	23,0587	23,0293
4	23,3373	23,2006	23,0850	22,9946	22,9326	22,9011
3	23,2606	23,1165	22,9946	22,8995	22,8342	22,8011
2	23,2080	23,0587	22,9326	22,8342	22,7668	22,7325
1	23,1812	23,0293	22,9011	22,8011	22,7325	22,6976

Elementtemperaturen auf der Spiegelebene

Die Temperaturen der Volumenelemente, die nicht in der Spiegelebene liegen, ergeben sich spiegelbildlich zu dieser.

8.9 Überprüfung des Wärmetransports durch den Luftstrom

Zum Simulationsbeginn (tau = 0; BS = 1; Intervall = 1) und nach Abarbeitung des Speicherabschnittes s = 1 ergeben sich:

t _{mittel}	= 10.0	Single ✓ ⇒ entsprechend Gl. (5.44)	(#)
t _L (1)	= 26.0	Single ✓ ⇒ entsprechend Lufteintritt nach Gl. (*)	
x _L (1)	= 0.0086	Single ✓ ⇒ entsprechend Lufteintritt nach Gl. (**)	
phi _L (1)	= 40.57453	Single ✓ ⇒ entsprechend Lufteintritt nach Gl. (***)	
h _L (1)	= 48.1844978	Single ✓ ⇒ entsprechend Lufteintritt nach Gl. (****)	
Q _L (1)	= -574500.3	Single ✓	

Kontrolle:

Es erfolgt lediglich eine Abschätzung des Wertes mittels der Beziehung:

$$Q_L(1) \approx \left(\frac{1}{\alpha L} + \underbrace{\frac{\Delta x}{4 \lambda} + \frac{\Delta y}{4 \lambda}}_{\text{Mittelwert}} \right)^{-1} (t_{\text{Schotteroberfläche}} - t_{\text{Luft}}) O_{\text{Schotter im Speicherabschnitt 1}} D\tau$$

Die Schotteroberfläche im gesamten Speicher ergibt sich zu:

$$O_{\text{Schotter}} = \sum_{p=1}^{p_{\max}} O(p) ZP(p)$$

Ermittlung mit den Daten der Tabelle 3.3 liefert:

$O_{\text{Schotter}} = 10201,1 \text{ m}^2$ bzw. bezogen auf einen Speicherabschnitt O_{Schotter} im Speicherabschnitt 1 = 102 m^2 .

Damit kann die Wärme an den Luftstrom in guter Näherung berechnet werden:

$$QL(1) \approx \left(\frac{1}{25,33} + \frac{0,014}{2 \cdot 2,3} \right)^{-1} (10 - 26) 102 \cdot 15 \text{ Ws} = -575697 \text{ Ws}.$$

Damit ergibt sich die spezifische Enthalpie am Austritt des Speicherabschnittes 1 (\equiv Eintritt in s = 2) zu:

$$hL(2) = 44.18486 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{entsprechend Gl. (5.41)}$$

Kontrolle:

Mit dem Luftmassenstrom nach Gl. (°) $mL = 9,575871 \text{ kg/s}$ folgt nach Gl. (5.41)

$$hL(2) = 48.1844978 \text{ kJ/kg} - 575697 / 15 / 9,575871 / 1000 \text{ kJ/kg} = 44,18 \text{ kJ/kg}.$$

Mit Hilfe des Unterprogramms ZUSTANDH gemäß Gl. (5.39) folgen aus $xL(1)$ und $hL(2)$:

$$xL(2) = 0.0086 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß h,x-Diagramm [6]}$$

$$tL(2) = 22.1017036 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß h,x-Diagramm [6]}$$

$$\phi L(2) = 51.2759 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß h,x-Diagramm [6]}$$

$$\text{Kondensat}(1) = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß Gl. (5.42)}$$

Kontrolle:

Entscheidend für den Austrittszustand am Ende von s = 1 sind $xL(1)$ und $hL(2)$. Liegt der entsprechende Luftzustandspunkt im ungesättigten Gebiet, dann gilt $xL(2) = xL(1)$ und es findet keine Kondensation statt. Anderenfalls wäre $xL(2) < xL(1)$. Da im vorliegenden Fall $\phi L(2) \approx 51 \%$ beträgt, erfolgte die Zustandsänderung der Luft beim Durchgang des Abschnittes s = 1 längs einer Isohygren.

Erweiterte Überprüfung anderer Konstellationen:

Um die übrigen möglichen Algorithmusvarianten zu überprüfen, werde der Programmablauf bei gleichen Ausgangsdaten des Zustandes (1) mit verschiedenen $hL(2)$ betrachtet.

A) Test mit $hL(2) = 25 \text{ kJ/kg}$:

$$hL(2) = 25.0 \quad \text{Single } \checkmark$$

$$xL(1) = 0.0086 \quad \text{Single } \checkmark$$

$$xL(2) = 0.00671947 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß h,x-Diagramm [6]}$$

$$tL(2) = 7.95151 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß h,x-Diagramm [6]}$$

$$\phi L(2) = 100.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß h,x-Diagramm [6]}$$

Der Zustandspunkt (2) liegt theoretisch im übersättigten Gebiet, er wird gemäß Bild 5.2 längs der Isenthalpen $h_L(2) = 25 \text{ kJ/kg}$ auf die Sättigungskurve verschoben. Dort liegt der mit dem Unterprogramm ZUSTANDH ermittelte praktische Endpunkt (2).

Der Kondensatstrom ergibt sich zu:

$$\text{Kondensat}(1) = -0.0180077422 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß Gl. (5.42)}$$

Kontrolle:

Mit Gl. (5.42) kann der momentane Kondensatstrom bestimmt werden. Er ergibt sich mit dem Luftmassenstrom nach Gl. (°) $m_L = 9,575871 \text{ kg/s}$ zu:

$$\text{Kondensat}(1) = 9,575871 (0,00671947 - 0,0086) \text{ kg}_w/\text{s} = -0,018 \text{ kg}_w/\text{s}.$$

Die weitere Programmabarbeitung ergibt:

$$t_L(2) = 10.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß Gl. (5.46)}$$

Kontrolle:

Die Luftaustrittstemperatur aus $s = 1$ (\equiv Lufteintrittstemperatur in $s = 2$) beträgt theoretisch $t_L(2) = 7,95 \text{ °C}$. Dieser Wert ist kleiner als die Oberflächentemperatur des Schotters von 10 °C . Diese war in Gl. (#) bereits als $t_{\text{mittel}} = 10 \text{ °C}$ ausgewiesen worden. Nach Gl. (5.46) wird aus Stabilitätsgründen ein "Noteingriff" vorgenommen und $t_L(2) = 10 \text{ °C}$ gesetzt.

B) Test mit $h_L(2) = 33,5 \text{ kJ/kg}$:

Hiermit soll die Arbeitsweise des Unterprogramms ZUSTANDH in unmittelbarer Nähe der Sättigungskurve ($\varphi = 1$) geprüft werden.

$h_L(2)$	$= 33.5$	Single \checkmark
$x_L(1)$	$= 0.0086$	Single \checkmark
$x_L(2)$	$= 0.0086$	Single $\checkmark \Rightarrow$ gemäß h,x-Diagramm [6]
$t_L(2)$	$= 11.68757$	Single $\checkmark \Rightarrow$ gemäß h,x-Diagramm [6]
$\phi_L(2)$	$= 99.31442$	Single $\checkmark \Rightarrow$ gemäß h,x-Diagramm [6]
$\text{Kondensat}(1)$	$= 0.0$	Single $\checkmark \Rightarrow$ gemäß Gl. (5.42)

C) Test mit $h_L(2) = 33,4 \text{ kJ/kg}$:

Der Austrittszustand des Luftstromes liegt praktisch auf der Sättigungskurve ($\varphi = 1$).

$h_L(2)$	$= 33.4$	Single \checkmark
$x_L(1)$	$= 0.0086$	Single \checkmark
$x_L(2)$	$= 0.0086$	Single $\checkmark \Rightarrow$ gemäß h,x-Diagramm [6]
$t_L(2)$	$= 11.60146$	Single $\checkmark \Rightarrow$ gemäß h,x-Diagramm [6]
$\phi_L(2)$	$= 100.0$	Single $\checkmark \Rightarrow$ gemäß h,x-Diagramm [6]

$$\text{Kondensat}(1) = 0.0 \quad \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß Gl. (5.42)}$$

D) Test mit $hL(2) = 33,3 \text{ kJ/kg}$:

Hiermit soll die unmittelbare Nähe zur Sättigungskurve ($\varphi = 1$) jedoch im übersättigten Gebiet untersucht werden.

$$\begin{aligned} hL(2) &= 33.3 & \text{Single } \checkmark \\ xL(1) &= 0.0086 & \text{Single } \checkmark \\ xL(2) &= 0.00858599 & \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß h,x-Diagramm [6]} \\ tL(2) &= 11.5592289 & \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß h,x-Diagramm [6]} \\ \phi L(2) &= 100.0 & \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß h,x-Diagramm [6]} \\ \text{Kondensat}(1) &= -0.000134165777 & \text{Single } \checkmark \Rightarrow \text{gemäß Gl. (5.42)} \end{aligned}$$

Damit arbeitet das Unterprogramm ZUSTANDH korrekt!

Bei interner Betrachtung des iterativen Berechnungsganges treten sehr geringe Abweichungen auf, die durch lineare Interpolationen im Bereich von 1 K -Schritten verursacht werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch die praktische Eignung des Unterprogramms.

8.10 Überprüfung der Bilanzbildungen

• Stündliche Wärme an die Luft

$QL(s)$ stellt die Wärme innerhalb des Zeitschrittes $\Delta\tau$ an den Luftstrom mL im Abschnitt s dar. Sie basiert auf der von einem Oberflächenelement abgegebenen Wärme.

- Zunächst ist gemäß den Gln. (5.22) bis (5.24) die Anzahl gleichartiger Flächen zu beachten.
- Des Weiteren muss über alle Partikel p innerhalb des Abschnittes s summiert werden.

Die richtige Arbeitsweise zeigen die nachfolgenden Programmausschnitte (vgl. dazu Bild 3.6).

Volumenelemente in $imax$ -Lage:

```
If j = k Then
    QL(s) = QL(s) + Qiaus * 8 * ZP(p) / smax
Else
    QL(s) = QL(s) + Qiaus * 16 * ZP(p) / smax
End If
```

Volumenelemente sind Bestandteil der Spiegelebene

Volumenelemente liegen oberhalb der Spiegelebene

Volumenelemente in $jmax$ -Lage:

```
QL(s) = QL(s) + Qjaus * 16 * ZP(p) / smax
```

Wärmeströme bei Volumenelementen in $kmax$ -Lage werden wegen der gegebenen Symmetrie nicht separat betrachtet, weshalb der Faktor 16 folgt.

Die Berechnung aller $QL(s)$ über alle Speicherabschnitte erfolgt durch die Schleife $s = 1 \dots smax$. Im Endergebnis wird die innerhalb einer Stunde an den Luftstrom übertragene Wärme bestimmt:

$$Q_{\text{Medium}}(\text{BS}) = Q_{\text{Medium}}(\text{BS}) + Q_L(s)$$

Diese Addition erfolgt beispielsweise bei 240 Intervallen pro Stunde ($D\tau = 15 \text{ s}$) und $s_{\text{max}} = 100$ insgesamt 24000-mal pro Betriebsstunde, wie durch eine separate Zählung auch kontrolliert wurde.

Dass die Rechenorganisation funktioniert, beweist die Gegenüberstellung der berechneten und der überschlägig abgeschätzten Wärmemenge $Q_L(1)$ zu Beginn des Abschnittes 8.9.

▪ Stündliche Kondensatmenge

Nach Gl. (5.42) wird der zu Beginn eines Zeitschrittes, momentane Kondensatstrom bestimmt. Die während des Zeitschrittes anfallende Kondensatmenge ergibt sich durch Multiplikation mit $D\tau$. Die entsprechende Addition gemäß der vorstehenden Beschreibung (z. B. 24000-mal) liefert die stündliche Kondensatmenge:

$$\text{Kondensatmenge}(\text{BS}) = \text{Kondensatmenge}(\text{BS}) + \text{Kondensat}(s) * D\tau$$

Damit wird die Gl. (5.43) erfüllt.

▪ Speicherzustand am Ende der Betriebsstunde

In völliger Analogie zum Abschnitt 8.5 wird die Speicherenthalpie bei Abarbeitung von Intervallmax bestimmt. Es ist zu beachten, dass nach den Bildern 3.4 und 3.6 jedes Volumenelement 8-mal im Partikel p mit der gleichen Temperatur enthalten ist. Es gilt der Teilalgorithmus:

```
Sum = 0
For s = 1 To smax
  For p = 1 To pmax
    For i = 1 To imax(p)
      For j = 1 To jmax(p)
        For k = 1 To kmax(p)
          Sum = Sum + CE(p) * (tn(s, p, i, j, k) - tLa) * 8 * ZP(p) / smax
        Next k
      Next j
    Next i
  Next p
Next s
QSpeicher(BS) = Sum
```

8.11 Zusammenstellung der Speicherwerte

Das Ende einer Betriebsstunde wird nach Bild 5.3 durch Intervall = Intervallmax gekennzeichnet. Es werden die auf Seite 65 (oben) festgelegten Zuordnungen durchgeführt.

Die Festlegung im Falle Richtung = 0 (keine Luftdurchströmung des Speichers) mit den Werten -273 dient der Steuerung des Rechnerausdruckes und der Gestaltung von Diagrammen.

Die endgültige Richtigkeit der Zuordnung kann anhand der wechselseitigen Speicherdurchströmung nochmals kontrolliert werden.

RichtungBS(BS) = Richtung Tagesstunde(BS) = tauUhr		
If Richtung = 1 Then tLein(BS) = tL(1) xLein(BS) = xL(1) phiLein(BS) = phiL(1) tLaus(BS) = tL(smax+1) xLaus(BS) = xL(smax+1) phiLaus(BS) = phiL(smax+1)	If Richtung = -1 Then tLein(BS) = tL(smax) xLein(BS) = xL(smax) phiLein(BS) = phiL(smax) tLaus(BS) = tL(0) xLaus(BS) = xL(0) phiLaus(BS) = phiL(0)	If Richtung = 0 Then tLein(BS) = -273 xLein(BS) = -273 phiLein(BS) = -273 tLaus(BS) = -273 xLaus(BS) = -273 phiLaus(BS) = -273

8.12 Zustand der Speicherabschnitte

Am Ende der Betriebsstunde BS = BSTest wird die Datei "Speicherfeld.dat" erzeugt.

```

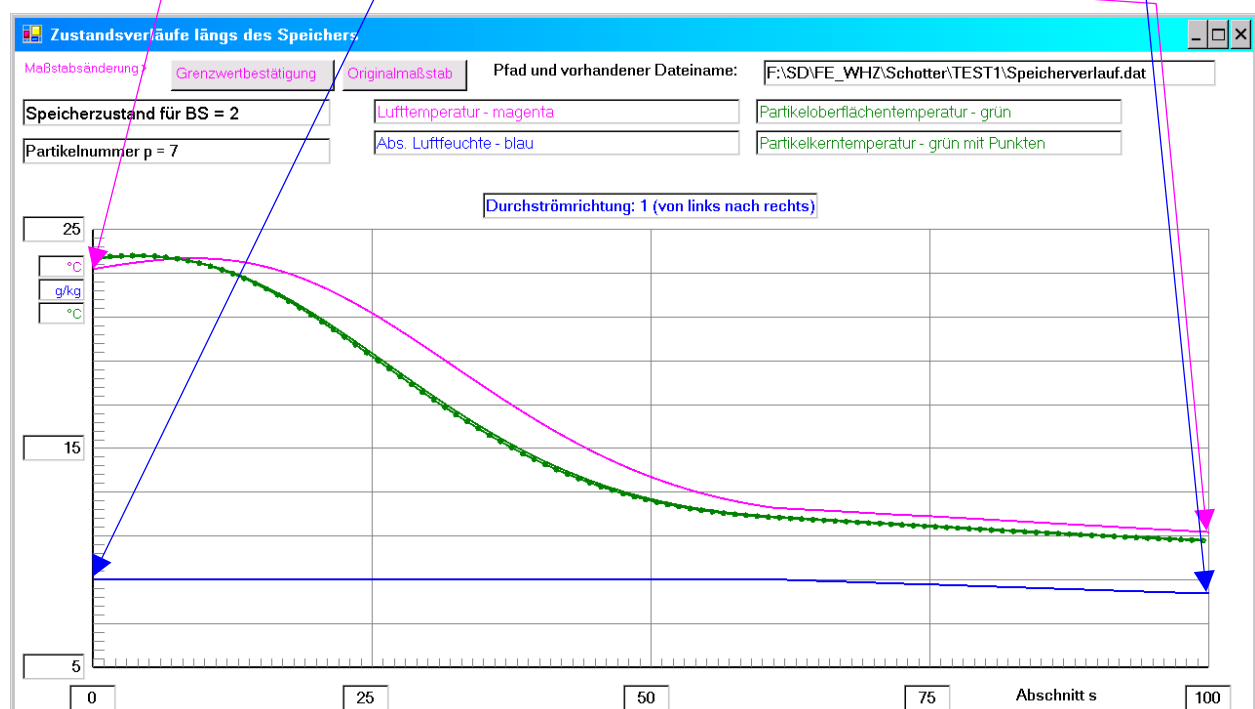
For s = 0 To smax + 1
    'Verlauf der abschnittswisen Lufttemperatur
    Write(1, tL(s))
    'Verlauf der abschnittswisen Luftfeuchte
    Write(1, xL(s))
    'Verlauf der abschnittswisen Kerntemperatur des Partikels pTest
    Write(1, tn(s, pTest, 1, 1, 1))
    'Verlauf der abschnittswisen Oberflächentemperatur des Partikels
    Write(1, tn(s, pTest, 1, jmax(pTest), 1))
Next s

```

Wird BSTest = 2 gesetzt, dann gelten die Luftzustandsgrößen am Speicherein- bzw. -austritt:

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg
2/20	23,2	11,2	9,0	8,4

Diese Daten finden sich im nachfolgend gezeigten Verlaufsdigramm wieder, das aufgrund der gespeicherten Daten erstellt wurde.



8.13 Bearbeitung der Temperaturfelder

• Umspeichern der Temperaturfelder

Nach der Abarbeitung aller Aktivitäten im Zeitschritt Δt wird das neuermittelte Temperaturfeld $t_n(s, p, i, j, k)$ dem ursprünglichen Feld $t(s, p, i, j, k)$ zugeordnet, sodass es beim nächsten Zeitschritt in gleicher Weise – wie bisher ausführlich gezeigt – verwendet werden kann. Eine Stichprobe soll die richtige Arbeitsweise des Umspeicherns kontrollieren. Zu diesem Zweck werden zu Beginn der zweiten Betriebsstunde ausgewählt:

$t_n(s = 50, p = 9, i = 2, j = 1 \dots 6, k = 1 \dots 6)$							$t(s = 50, p = 9, i = 2, j = 1 \dots 6, k = 1 \dots 6)$						
j	k = 6	k = 5	k = 4	k = 3	k = 2	k = 1	j	k = 6	k = 5	k = 4	k = 3	k = 2	k = 1
6	10,9618	10,9167	10,8839	10,8611	10,8467	10,8398	6	10,9618	10,9167	10,8839	10,8611	10,8467	10,8398
5	10,9167	10,8677	10,8320	10,8071	10,7915	10,7839	5	10,9167	10,8677	10,8320	10,8071	10,7915	10,7839
4	10,8839	10,8320	10,7940	10,7675	10,7509	10,7428	4	10,8839	10,8320	10,7940	10,7675	10,7509	10,7428
3	10,8611	10,8071	10,7675	10,7399	10,7225	10,7141	3	10,8611	10,8071	10,7675	10,7399	10,7225	10,7141
2	10,8467	10,7915	10,7509	10,7225	10,7046	10,6959	2	10,8467	10,7915	10,7509	10,7225	10,7046	10,6959
1	10,8398	10,7839	10,7428	10,7141	10,6959	10,6871	1	10,8398	10,7839	10,7428	10,7141	10,6959	10,6871

Die Zuordnung beim Umspeichern des Temperaturfeldes erfolgte korrekt!

• Abspeichern des letzten Temperaturfeldes

Das Abspeichern des Temperaturfeldes erfolgt für $BS = BS_{\max}$ und $\text{Intervall} = \text{Intervall}_{\max}$.

Dies ist genau genommen der vorletzte Durchgang der Simulationsrechnung.

```

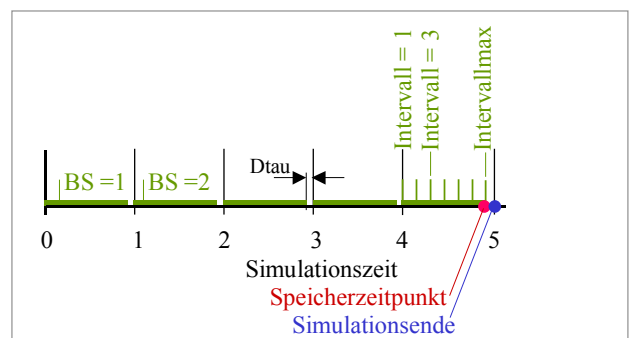
If BS = BSmax And Intervall = Intervallmax Then
Feld = Objektbezeichnung + "Speicherfeld.dat"
FileOpen(1, Feld, OpenMode.Output)
  For s = 1 To smax
    For p = 1 To pmax
      For i = 1 To imax(p)
        For j = 1 To jmax(p)
          For k = 1 To kmax(p)
            Write(1, t(s, p, i, j, k))
          Next k
        Next j
      Next i
    Next p
  Next s
FileClose(1)
End If

```

Gemäß dem nebenstehenden Bild ist es der rot markierte Zeitpunkt. Der letzte Simulationsdurchgang ist blau gekennzeichnet.

Würde die gespeicherte Datei bei einem neuen Beispiel geladen, stünde sie zum Start zum

Zeitpunkt 0 zur Verfügung. Damit erfolgt die Datenspeicherung in der beabsichtigten Weise.



9 Komplettbeispiele

Die nachfolgenden Simulationen werden durchgeführt, um die kompletten Abläufe zu testen und die Richtigkeit der Darstellungen zu überprüfen. In allen folgenden Beispielen liegt hierfür das Realbeispiel nach Abschnitt 2 zugrunde. Als thermische Randbedingung gelte der Entwurfstag 3 "Heiterer Sommertag im Juli". Die maximale Simulationszeit beträgt 72 Betriebsstunden.

9.1 Beispiel 1 (Basisbeispiel)

Für die gesamte Simulationszeit gelte eine einheitliche Durchflussrichtung (Richtung = 1) und die Beaufschlagung mit dem maximalen Luftvolumenstrom (30000 m³/h).

Hauptprogramm

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glöck (V1/2007)

Daten des Speichermaterials

Rho kg/m ³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Hohlraumanteil %	Äquivalenter Füllkörperdurchmesser mm
2754	2,3	850	44	70,66

Ausgewählte Partikelgrößen und ihre Verteilung

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volumen in cm ³	18	87	110	154	221	322	449	606	1150	0
Anteil in %	4,1	6,5	11,1	13,8	25,8	21,2	9,9	5,6	2	0

Oberflächen-Volumen-Korrelation

Oberfläche = 6,8209 * Volumen^{0,6552}

Oberfläche in cm² und Volumen in cm³

Daten zum Simulationsablauf

Maximale Anzahl der Simulationsstunden in h: 72

Beginn der Simulation (Uhrzeit: 0 ... 23): 18

Zeitschrittweite in s (ganzzahlig in 3600 teilbar): 15

Luftvolumenstrom in m³/h (Maximalwert): 30000

Ausgewählter Entwurfstag (ETagfix: 1 ... 20): 3

Starttemperatur in °C für den gesamten Speicher: 10

Bei tStart = 273, Laden einer Temperaturverteilung:

Abläufe:

1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!
2. Daten aus Datei laden oder Neueingabe vornehmen!
3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden!
4. DATENSPEICHERUNG drücken!
5. ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE bzw. ERGEBNISSE oder DIAGRAMM drücken!

Spezielle Untersuchungen zum Zustand längs des Speichers

Zustand am Ende der Betriebsstunde (Eingabewert > 0): 69

Gespeichert werden: Lufttemperatur für alle Speicherabschnitte s
Abs. Luftfeuchte für alle Speicherabschnitte s

Spezielle Betrachtung des Partikels (Eingabewert p = 1 ... pmax): 7

Gespeichert werden: Temperatur in Partikelmitte t(s, p, i=1, j=1, k=1)
Temperatur an der Partikeloberfläche t(s, p, i=1, j=jmax, k=1)

Speicherung der Ergebnisse in der Datei:
F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_1\Speicherverlauf.dat

Diagrammanzeige nach erfolgter Simulation

Buttons: STARTEN, DATEI LADEN, AUFBEREITUNG DER EINGABEN + DATENSPEICHERUNG, ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, BEENDEN, DRUCK ERGEBNISSE, DIAGRAMM

Bild 9.1 Hauptprogramm (Maske 1) für Beispiel_1

Tabelle 9.1 Ausdruck der Eingabewerte

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_1\

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Speicherabmessungen und Luftvolumenstrom:

Höhe m	Breite m	Länge m	Luftvolumenstrom m ³ /h
2,500	10,000	6,500	30000,0

Daten des Speichermaterials:

Rho kg/m ³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Hohlraumanteil %	Äquivalenter Durchmesser mm
2754,0	2,300	850,000	44,0	70,66

Schottervolumen m ³	Schottermasse kg	Luftvolumen m ³
91,00	250614,000	71,50

Partikeldaten:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Partikelvolumina in cm ³									
18,00	87,00	110,00	154,00	221,00	322,00	449,00	606,00	1150,00	0,00
Partikelanteile in %									
4,10	6,50	11,10	13,80	25,80	21,20	9,90	5,60	2,00	0,00
Partikeloberflächen in cm ²									
45,32	127,24	148,38	184,97	234,36	299,91	372,90	453,86	690,58	0,00
Approximierte Partikelquadratseite in cm									
3,53	3,30	3,59	6,93	7,76	5,27	5,94	10,62	12,95	0,00
Approximierte Partikellänge in cm									
1,45	7,99	8,54	3,21	3,67	11,58	12,72	5,37	6,86	0,00
Gesamtvolumen der approximierten Partikel in m ³									
3,73	5,92	10,10	12,56	23,48	19,29	9,01	5,10	1,82	0,00
Anzahl der approximierten Partikel									
207278	67989	91827	81545	106235	59913	20065	8409	1583	0
Anteile der Partikeloberflächen an der Gesamtoberfläche in %									
9,21	8,48	13,36	14,79	24,41	17,61	7,33	3,74	1,07	0,00

Gitterdarstellung der Partikel und Ermittlung des maximalen Zeitschrittes:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Unterteilung der halben Quadratseite: Dx(p) in cm									
Maximale Gitternummer: jmax(p) = kmax(p)									
1,76	1,65	1,79	1,16	1,29	1,32	1,49	1,06	1,08	0,00
1	1	1	3	3	2	2	5	6	0
Unterteilung der halben Quaderlänge: Dy(p) in cm									
Maximale Gitternummer: imax(p)									
0,72	1,33	1,07	1,60	1,84	1,16	1,06	1,34	1,14	0,00
1	3	4	1	1	5	6	2	3	0
Maximale Zeitschrittweite für die Partikelapproximation: DtauPartikel(p) in s									
19,90	39,19	33,96	26,96	34,09	26,83	28,32	21,87	20,50	0,00

Maximal wählbare Zeitschrittweite:

19 s

Vorgeschlagene Zeitschrittweite:

18 s (ganzzahlig in 3600 s enthalten)

Daten zum Simulationsablauf:

Simulationsstunden:	72 h
Tagesstartzeit:	18 Uhr
Gewählte Zeitschrittweite:	15 s
Betriebsablauf nach Entwurfstag:	3
Anzahl der Speicherunterteilungen:	100
Starttemperatur:	10,0 °C

Zeitverläufe bezogen auf die Entwurfstage

Zielstellung:
☒ Kontrolle bzw. Datenergänzung
☐ Neueingabe der Daten (Datei noch nicht vorhanden)

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname:

Entwurfstag: Tagesstunde

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
tL Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes in °C																							
16,1	15,4	14,7	14,1	14,1	14,8	16,4	18,9	21,3	23,4	24,9	25,9	26,7	27,1	27,4	27,4	26,8	26	24,7	23,2	21,9	20,6	19,5	18,5
xL Absolute Luftfeuchte des Luftvolumenstromes in g_Wasser / kg_trockene Luft																							
9,2	9,1	8,9	8,8	8,7	8,9	9,2	9,4	9,5	9,4	9	8,7	8,6	8,5	8,5	8,4	8,5	8,6	8,8	9	9,2	9,3	9,4	9,5
VLanteil Anteile des Luftvolumenstromes bezogen auf den Maximalwert (Eingabe im Hauptprogramm)																							
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Richtung des Luftvolumenstromes durch den Schotterspeicher (Normalrichtung 1; Gegenrichtung -1; Stillstand 0)																							
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Bild 9.2 Zeitverläufe (Maske 2) für Beispiel_1

Tabelle 9.2 Ausdruck der Zeitverläufe

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_1\

Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 3:

Tages- stunde	tL °C	xL g/kg	phiL %	VLanteil -	Richtung -
1	16,1	9,2	79,7	1,00	1
2	15,4	9,1	82,4	1,00	1
3	14,7	8,9	84,4	1,00	1
4	14,1	8,8	86,7	1,00	1
5	14,1	8,7	85,8	1,00	1
6	14,8	8,9	83,8	1,00	1
7	16,4	9,2	78,2	1,00	1
8	18,9	9,4	68,2	1,00	1
9	21,3	9,5	59,4	1,00	1
10	23,4	9,4	51,7	1,00	1
11	24,9	9,0	45,3	1,00	1
12	25,9	8,7	41,3	1,00	1
13	26,7	8,6	38,9	1,00	1
14	27,1	8,5	37,6	1,00	1
15	27,4	8,5	36,9	1,00	1
16	27,4	8,4	36,5	1,00	1
17	26,8	8,5	38,3	1,00	1
18	26,0	8,6	40,6	1,00	1
19	24,7	8,8	44,8	1,00	1
20	23,2	9,0	50,2	1,00	1
21	21,9	9,2	55,5	1,00	1

Tages- stunde	tL °C	xL g/kg	phiL %	VLanteil -	Richtung -
22	20,6	9,3	60,7	1,00	1
23	19,5	9,4	65,7	1,00	1
24	18,5	9,5	70,7	1,00	1

Legende:

tL Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes

xL Verlauf der absoluten Feuchte des Luftvolumenstromes

phiL Verlauf der relativen Feuchte des Luftvolumenstromes

VLanteil Anteil des Luftvolumenstromes vom Maximalwert

Richtung Richtung des Luftstromes: Normalrichtung 1; Gegenrichtung -1, Stillstand 0

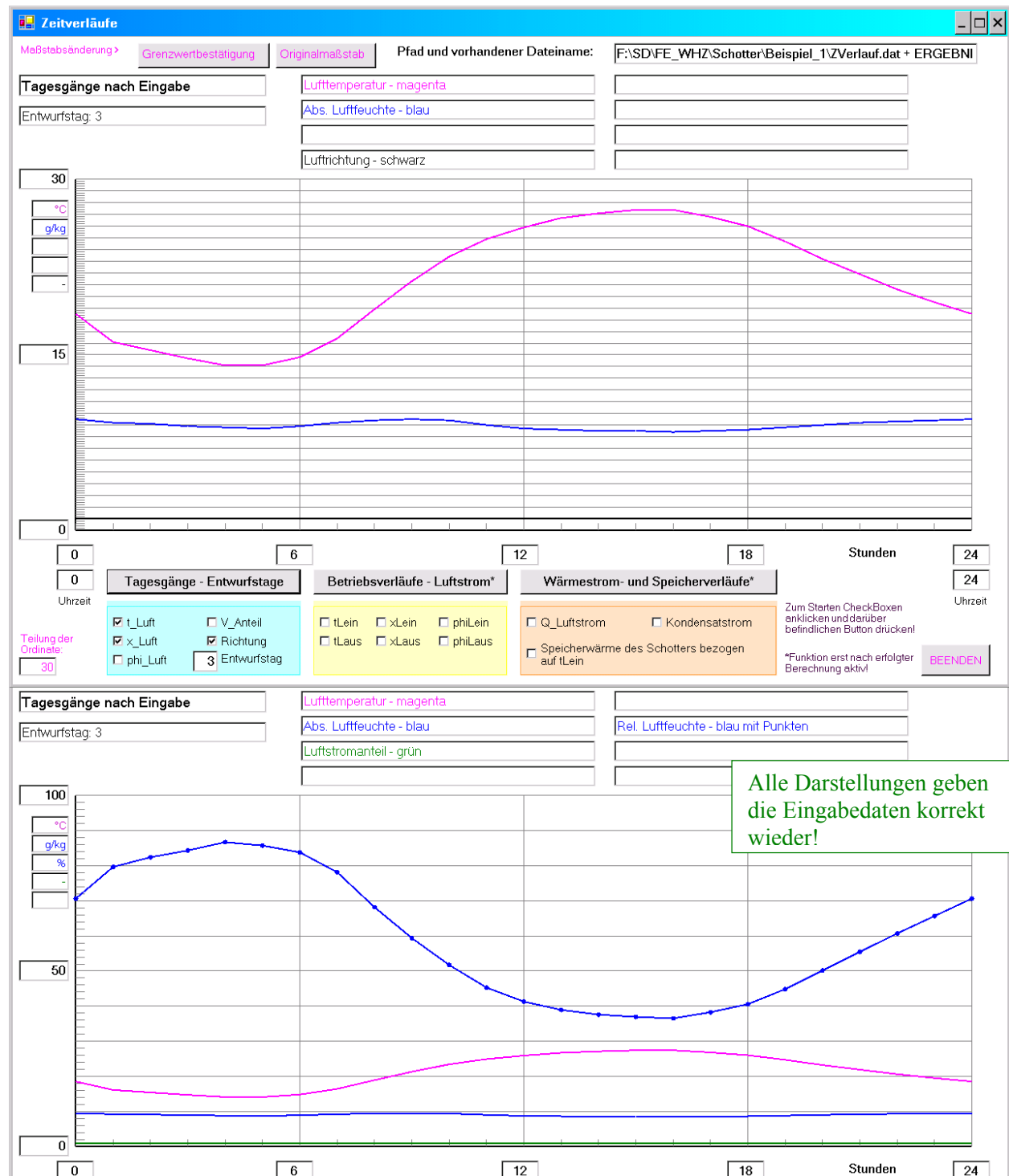


Bild 9.3 Tagesverläufe gemäß Entwurfstag 3 in verschiedenen Darstellungen für Beispiel_1

Tabelle 9.3 Ergebnisausdruck**OBJEKTBEZEICHNUNG:** F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_1**Schotterspeicher mit Luftdurchströmung**
Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,8
1/19	24,7	10,2	8,8	7,8	44,8	100,0	-32,5	-173,5	-696,7
2/20	23,2	11,2	9,0	8,4	50,1	100,0	-28,4	-151,7	-456,3
3/21	21,9	12,2	9,2	9,0	55,5	100,0	-14,4	-117,9	-261,4
4/22	20,6	13,0	9,3	9,3	60,7	98,4	-2,4	-88,4	-96,0
5/23	19,5	15,2	9,4	9,4	65,7	86,5	0,0	-61,0	30,1
6/24	18,5	18,0	9,5	9,5	70,6	72,8	0,0	-24,2	113,5
7/ 1	16,1	20,2	9,2	9,2	79,6	61,4	0,0	19,5	235,7
8/ 2	15,4	21,2	9,1	9,1	82,4	57,3	0,0	51,7	225,9
9/ 3	14,7	21,0	8,9	8,9	84,4	56,6	0,0	62,6	204,6
10/ 4	14,1	20,2	8,8	8,8	86,7	58,8	0,0	64,2	176,0
11/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,5	0,0	56,9	119,2
12/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,3	0,0	40,7	37,3
13/ 7	16,4	16,6	9,2	9,2	78,2	77,1	0,0	16,2	-73,3
14/ 8	18,9	15,7	9,4	9,4	68,2	83,7	0,0	-15,4	-205,6
15/ 9	21,3	15,0	9,5	9,5	59,4	88,0	0,0	-47,8	-299,8
16/10	23,4	14,8	9,4	9,4	51,8	88,3	0,0	-74,1	-350,0
17/11	24,9	15,1	9,0	9,0	45,3	83,0	0,0	-91,1	-347,8
18/12	25,9	16,0	8,7	8,7	41,3	75,9	0,0	-97,3	-309,8
19/13	26,7	17,4	8,6	8,6	38,9	68,6	0,0	-94,5	-262,7
20/14	27,1	19,2	8,5	8,5	37,6	60,7	0,0	-84,5	-202,0
21/15	27,4	21,0	8,5	8,5	36,9	54,2	0,0	-69,9	-149,8
22/16	27,4	22,8	8,4	8,4	36,5	48,2	0,0	-53,7	-96,2
23/17	26,8	24,2	8,5	8,5	38,3	44,6	0,0	-35,1	-25,7
24/18	26,0	25,4	8,6	8,6	40,6	42,1	0,0	-15,5	37,1
25/19	24,7	26,2	8,8	8,8	44,8	41,0	0,0	4,4	109,5
26/20	23,2	26,7	9,0	9,0	50,1	40,7	0,0	24,9	173,3
27/21	21,9	26,9	9,2	9,2	55,5	41,1	0,0	42,6	207,7
28/22	20,6	26,8	9,3	9,3	60,7	41,9	0,0	56,0	228,5
29/23	19,5	26,2	9,4	9,4	65,7	43,6	0,0	65,0	228,7
30/24	18,5	25,4	9,5	9,5	70,6	46,4	0,0	68,9	219,0
31/ 1	16,1	24,3	9,2	9,2	79,6	48,0	0,0	76,5	284,1
32/ 2	15,4	23,1	9,1	9,1	82,4	51,1	0,0	80,7	245,2
33/ 3	14,7	21,8	8,9	8,9	84,4	54,1	0,0	75,2	211,5
34/ 4	14,1	20,5	8,8	8,8	86,7	57,9	0,0	68,8	178,2
35/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,2	0,0	58,5	119,8
36/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,2	0,0	41,1	37,5
37/ 7	16,4	16,6	9,2	9,2	78,2	77,1	0,0	16,3	-73,3
38/ 8	18,9	15,7	9,4	9,4	68,2	83,7	0,0	-15,4	-205,6
39/ 9	21,3	15,0	9,5	9,5	59,4	88,0	0,0	-47,8	-299,8
40/10	23,4	14,8	9,4	9,4	51,8	88,3	0,0	-74,1	-350,0
41/11	24,9	15,1	9,0	9,0	45,3	83,0	0,0	-91,1	-347,8
42/12	25,9	16,0	8,7	8,7	41,3	75,9	0,0	-97,3	-309,8
43/13	26,7	17,4	8,6	8,6	38,9	68,6	0,0	-94,5	-262,7
44/14	27,1	19,2	8,5	8,5	37,6	60,7	0,0	-84,5	-202,0
45/15	27,4	21,0	8,5	8,5	36,9	54,2	0,0	-69,9	-149,8
46/16	27,4	22,8	8,4	8,4	36,5	48,2	0,0	-53,7	-96,2
47/17	26,8	24,2	8,5	8,5	38,3	44,6	0,0	-35,1	-25,7
48/18	26,0	25,4	8,6	8,6	40,6	42,1	0,0	-15,5	37,1
49/19	24,7	26,2	8,8	8,8	44,8	41,0	0,0	4,4	109,5
50/20	23,2	26,7	9,0	9,0	50,1	40,7	0,0	24,9	173,3
51/21	21,9	26,9	9,2	9,2	55,5	41,1	0,0	42,6	207,7
52/22	20,6	26,8	9,3	9,3	60,7	41,9	0,0	56,0	228,5
53/23	19,5	26,2	9,4	9,4	65,7	43,6	0,0	65,0	228,7
54/24	18,5	25,4	9,5	9,5	70,6	46,4	0,0	68,9	219,0
55/ 1	16,1	24,3	9,2	9,2	79,6	48,0	0,0	76,5	284,1
56/ 2	15,4	23,1	9,1	9,1	82,4	51,1	0,0	80,7	245,2
57/ 3	14,7	21,8	8,9	8,9	84,4	54,1	0,0	75,2	211,5

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
58/ 4	14,1	20,5	8,8	8,8	86,7	57,9	0,0	68,8	178,2
59/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,2	0,0	58,5	119,8
60/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,2	0,0	41,1	37,5
61/ 7	16,4	16,6	9,2	9,2	78,2	77,1	0,0	16,3	-73,3
62/ 8	18,9	15,7	9,4	9,4	68,2	83,7	0,0	-15,4	-205,6
63/ 9	21,3	15,0	9,5	9,5	59,4	88,0	0,0	-47,8	-299,8
64/10	23,4	14,8	9,4	9,4	51,8	88,3	0,0	-74,1	-350,0
65/11	24,9	15,1	9,0	9,0	45,3	83,0	0,0	-91,1	-347,8
66/12	25,9	16,0	8,7	8,7	41,3	75,9	0,0	-97,3	-309,8
67/13	26,7	17,4	8,6	8,6	38,9	68,6	0,0	-94,5	-262,7
68/14	27,1	19,2	8,5	8,5	37,6	60,7	0,0	-84,5	-202,0
69/15	27,4	21,0	8,5	8,5	36,9	54,2	0,0	-69,9	-149,8
70/16	27,4	22,8	8,4	8,4	36,5	48,2	0,0	-53,7	-96,2
71/17	26,8	24,2	8,5	8,5	38,3	44,6	0,0	-35,1	-25,7
72/18	26,0	25,4	8,6	8,6	40,6	42,1	0,0	-15,5	37,1

Legende: {Ende der Betriebsstunde = 1 Zeitschritt vor Erreichen der vollen Stunde!}

tLein Lufteintrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde
tLaus Luftaustrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde
xLein absolute Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
xLaus absolute Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
phiLein relative Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
phiLaus relative Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
mKon ausgefallener Kondensatmassenstrom während der Betriebsstunde
QLuft mittlerer Wärmestrom während der Betriebsstunde an die strömende Luft
QSpeicher Speicherwärme im Schotter bezogen auf die Lufteintrittstemperatur
am Ende der Betriebsstunde

Hinweis zu den Ergebnissen: - bedeutet Stillstand des Speichers

Das letzte Temperaturfeld ist gespeichert in der Datei:

F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_1\Speicherfeld.dat

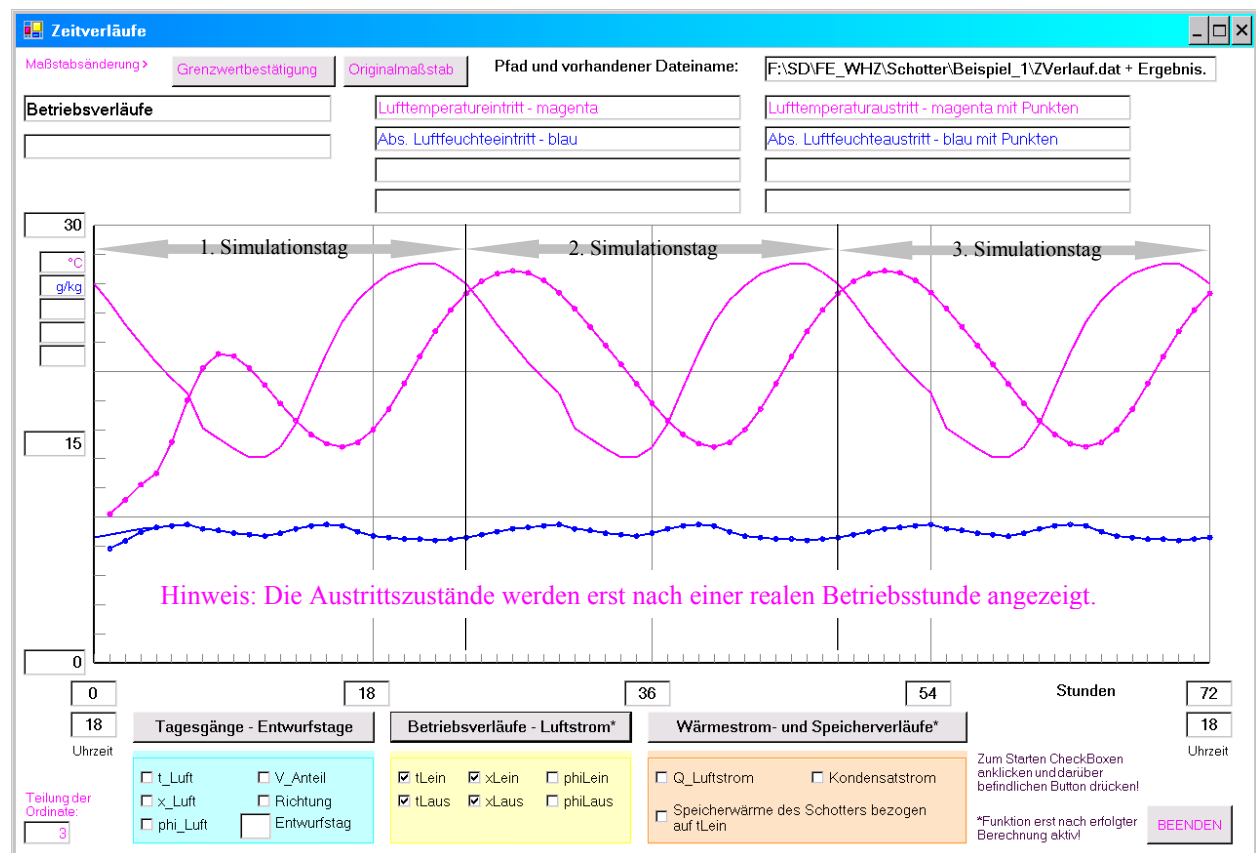


Bild 9.4 Simulationsverläufe für die Luftein- und -austrittstemperatur sowie die absoluten Luftfeuchten für Beispiel_1

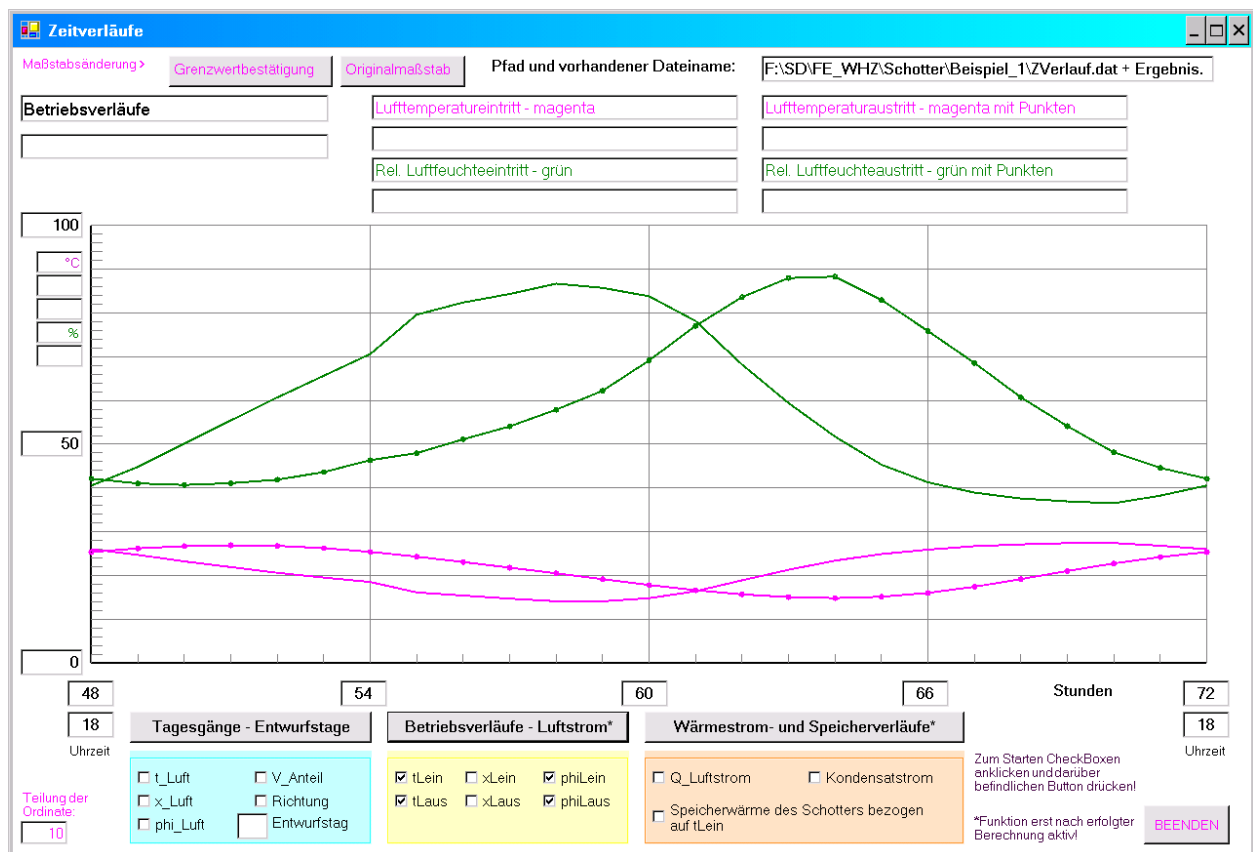


Bild 9.5 Simulationsverläufe für die Luftein- und -austrittstemperatur sowie die relativen Luftfeuchten für Beispiel_1 während der letzten 24 Stunden

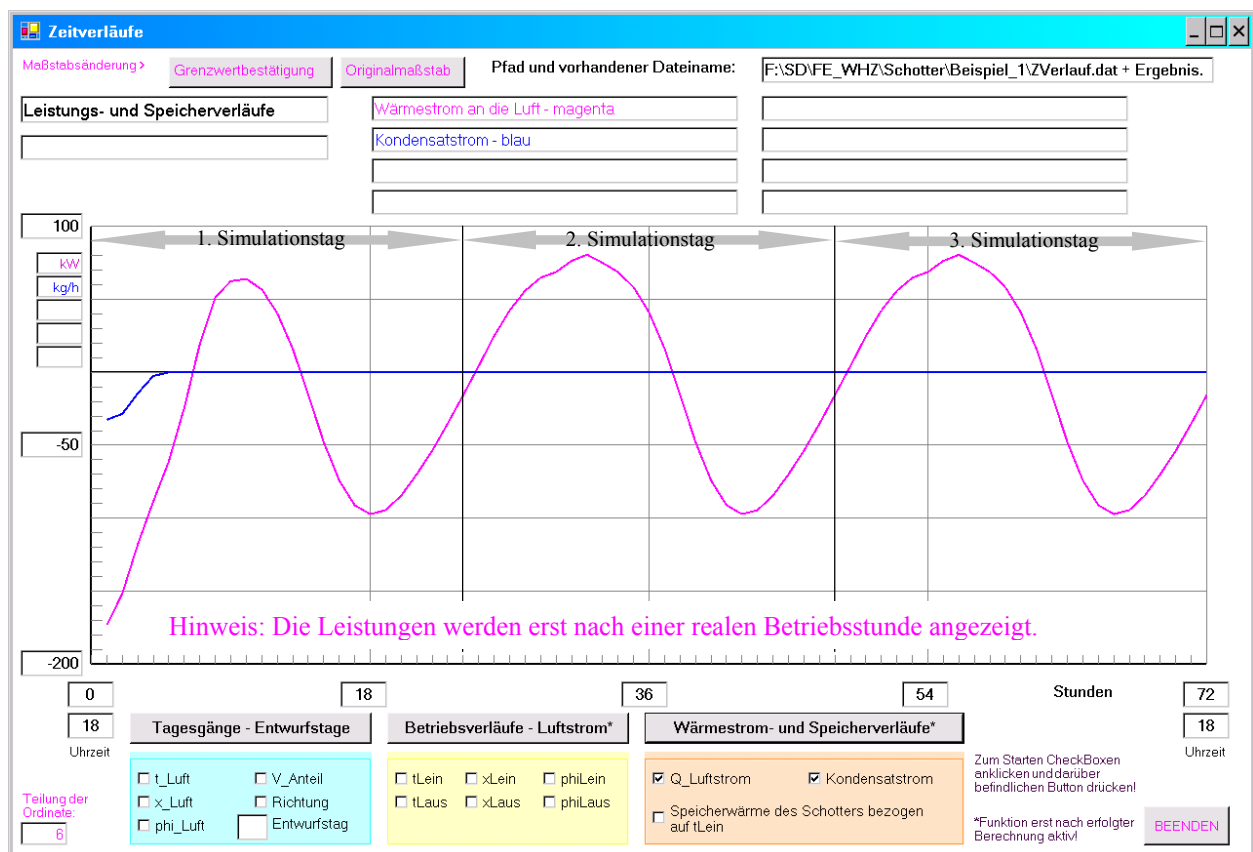


Bild 9.6 Simulationsverlauf für den Wärme- und Kondensatstrom für Beispiel_1

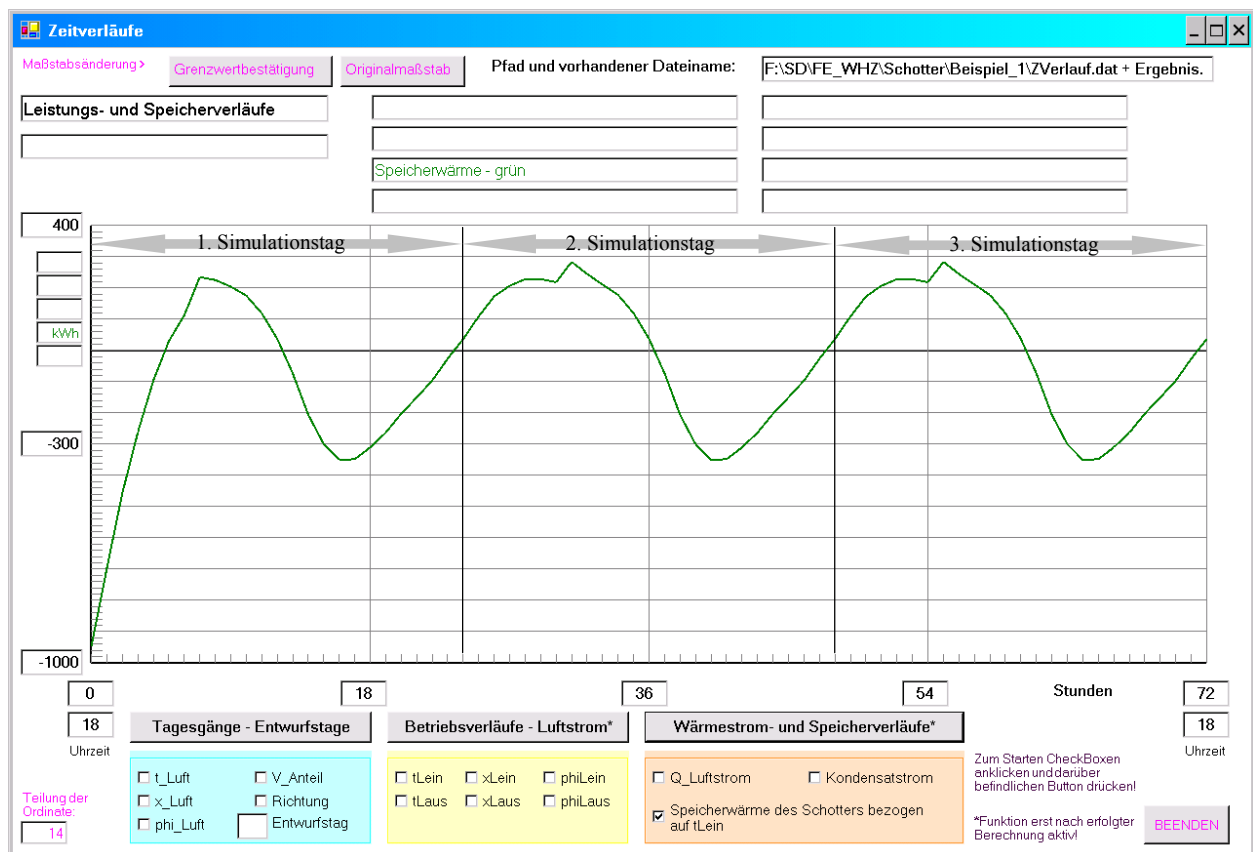


Bild 9.7 Simulationsverlauf der auf die Lufteintrittstemperatur bezogenen Speicherwärme für Beispiel_1

Feststellungen:

- Die Daten in Tabelle 9.3 sind unter dem Aspekt zu betrachten, dass das Ende einer Betriebsstunde stets einen Zeitschritt vor dieser vollen Stunde (Intervall = Intervallmax) – wie aus Bild 5.3 ersichtlich und in der Legende zum Rechnerausdruck vermerkt – liegt. Somit erklären sich auch die beispielsweise geringen Abweichungen der relativen Feuchte in den Tabellen 9.2 und 9.3.
- Die Kurvenverläufe zeigen, dass der anfängliche große Unterschied zwischen Lufteintrittstemperatur (26 °C) und Schottertemperatur (10 °C) rasch abgebaut wird, wobei eine **stabile Lösungsentwicklung** auftritt. Somit arbeitet die im Simulationsmodell implementierte Numerik wie beabsichtigt.
- Nach einer Einschwingphase von etwa einem halben Tag (12 Betriebsstunden) entstehen sich wiederholende Schwingungen der Zustandsgrößen. Es gelten beim Start um 18⁰⁰ Uhr an den Folgetagen stets um 6⁰⁰ Uhr:

Betriebsstunde	Lufteintrittstemperatur	Luftaustrittstemperatur	Wärmeleistung	Speicherwärme
12	14,8 °C	17,8 °C	40,7 kW	37,3 kWh
36	14,8 °C	17,8 °C	41,1 kW	37,5 kWh
60	14,8 °C	17,8 °C	41,1 kW	37,5 kWh

Damit können Untersuchungen auf eine **Simulationszeit** von etwa **zwei Tagen** beschränkt werden.

- Kondensat fällt nur in den ersten Betriebsstunden aus, da zu Beginn der Simulation der Schotter die niedrige Temperatur von 10 °C besaß. Im weiteren Verlauf sind die zeitlichen Änderungen der Lufttemperatur und Luftfeuchte so gering, dass das Speichermaterial "thermisch relativ gut folgen kann".

Kontrolle:

Gemäß Tabelle 9.3 fällt während der ersten Betriebsstunde etwa 1 g_W/kg_{tL} aus. Bei einem Luftmassenstrom von etwa 9,5 kg_{tL} /s folgt der stündliche Kondensatstrom zu:

$$\dot{m}_{\text{Kondensat}} \approx 9,5 \cdot (-0,001) \cdot 3600 \text{ kg}_W/\text{h} = -34 \text{ kg}_W/\text{h}.$$

Damit wird die angegebene Größenordnung (Mittelwert -32,5 kg_W/h) bestätigt.

Nach Beendigung der Kondensation ist folgerichtig die absolute Eintrittsfeuchte stets gleich der absoluten Austrittsfeuchte. Dies bestätigen die Daten in Tabelle 9.3 und der x-Verlauf im Bild 9.4.

Selbstverständlich gilt dies nicht gleichermaßen für die relativen Feuchten, da hierbei die Lufttemperaturen mit eingehen, wie Bild 9.5 für den letzten Simulationstag verdeutlicht. Beispielsweise setzt nach der 61. Betriebsstunde eine Kühlung des Luftstromes ein, der zu einer höheren relativen Luftfeuchte am Austritt führt.

- Der Schotterspeicher wird modellgemäß nach außen hin als adiabat betrachtet. Somit muss die vom Luftstrom aufgenommene Wärme gleich der von ihm abgegebenen Wärme innerhalb eines Entwurfstages sein.

Kontrolle:

Im Zeitraum von der 49. Betriebsstunde bis zur 72. Betriebsstunde ergeben sich:

Von der 49. Betriebsstunde (19⁰⁰ Uhr) bis zur 61. Betriebsstunde (7⁰⁰ Uhr) wird die Luft erwärmt. Die zugeführte Wärme beträgt: **678,9 kWh**.

Von der 62. Betriebsstunde (8⁰⁰ Uhr) bis zur 72. Betriebsstunde (18⁰⁰ Uhr) wird die Luft gekühlt. Die abgeführte Wärme beträgt: **-678,9 kWh**.

Damit liegt eine ausgeglichene Wärmebilanz vor.

- Die im Schotter gespeicherte Wärme wird stets auf die Lufteintrittstemperatur bezogen, um das momentane, theoretische Leistungspotenzial abschätzen zu können.

Zum Start weisen die Tabelle 9.3 und das Bild 9.7 den Wert -946,8 kWh aus. **Die gleiche Größe ist bereits im Abschnitt 8.5 nachgewiesen worden.**

- Schließlich stehen die innerhalb einer Stunde an den Luftstrom übertragene Wärme und die am Ende einer Betriebsstunde ermittelte Speicherwärme in einem Zusammenhang. Die Gegenüberstellung muss jedoch die unterschiedliche Bezugsbasis der Speicherwärme – die Luft-eintrittstemperatur – beachten.

Kontrolle:

Die Überprüfung der Wärmebilanz ist einfach, wenn die Luft Eintrittstemperaturen während des Überprüfungszeitraumes konstant bleiben. Dies ist im betrachteten Beispiel zwischen 4⁰⁰ und 5⁰⁰ Uhr der Fall. Es gelten auszugsweise aus Tabelle 9.3:

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
34/ 4	14,1	20,5	8,8	8,8	86,7	57,9	0,0	68,8	178,2
35/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,2	0,0	58,5	119,8

Hieraus folgt:

$$Q_{\text{Speicher}}(5^{00} \text{ Uhr}) = Q_{\text{Speicher}}(4^{00} \text{ Uhr}) - Q_{\text{Luft}}(5. \text{ Betriebsstunde}) \cdot 1 \text{ h}$$

$$Q_{\text{Speicher}}(5^{00} \text{ Uhr}) = 178,2 \text{ kWh} - 58,5 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 119,7 \text{ kWh}$$

Die Wärmebilanz ist erfüllt!

Im Bild 9.7 besteht noch eine Auffälligkeit zwischen 24⁰⁰ Uhr und 1⁰⁰ Uhr. Diese wird durch den großen Sprung der Luft eintrittstemperatur verursacht.

Kontrolle:

Gemäß Tabelle 9.3 beträgt am Ende der 30. Betriebsstunde (24⁰⁰ Uhr) die Speicherwärme $Q_{\text{Speicher}} = 219,0 \text{ kWh}$.

Für die Wärmekapazität des gesamten Schotters im Speicher gilt

$$C_{\text{Speicher}} = m_{\text{Speicher}} c = 250614 \cdot 850 / 3600000 \text{ kWh/K} = 59,2 \text{ kWh/K}$$

und in erster Näherung für die mittlere Schottertemperatur

$$t_{\text{Schotter,mittel}} = t_{\text{Luft,Eintritt}} + Q_{\text{Speicher}} / C_{\text{Speicher}}$$

Damit beträgt die mittlere Schottertemperatur um 24⁰⁰ Uhr

$$t_{\text{Schotter,mittel}} = 18,5 \text{ °C} + 219,0 / 59,2 \text{ K} = 22,20 \text{ °C}$$

und um 1⁰⁰ Uhr

$$t_{\text{Schotter,mittel}} = 16,1 \text{ °C} + 284,1 / 59,2 \text{ K} = 20,90 \text{ °C}$$

Der Schotter hat sich somit um 1,30 K abgekühlt, wodurch die entspeicherte Wärme an die Luft übertragen wurde:

$$Q_{\text{Luft}} = 59,2 \cdot 1,3 \text{ kWh} \approx 77 \text{ kWh}$$

Der Wärmestrom an die Luft betrug 1 h lang 76,5 kW. **Damit besteht Gleichheit!**

- Alle Diagrammwiedergaben stimmen mit den Daten in Tabelle 9.3 überein.

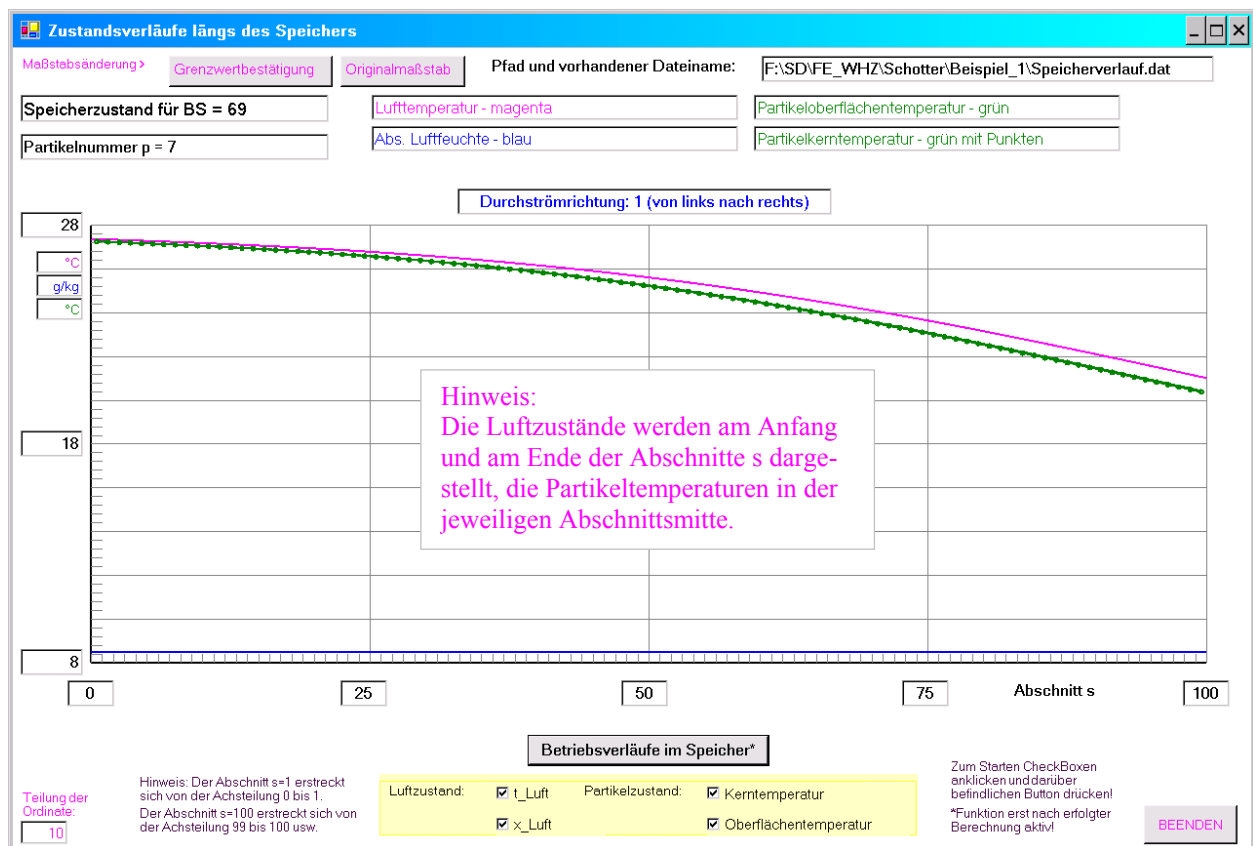


Bild 9.8 Lufttemperatur und absolute Luftfeuchte sowie ausgewählte Temperaturen des Partikels 7 längs der Speicherabschnitte $s = 1 \dots 100$ für Beispiel_1

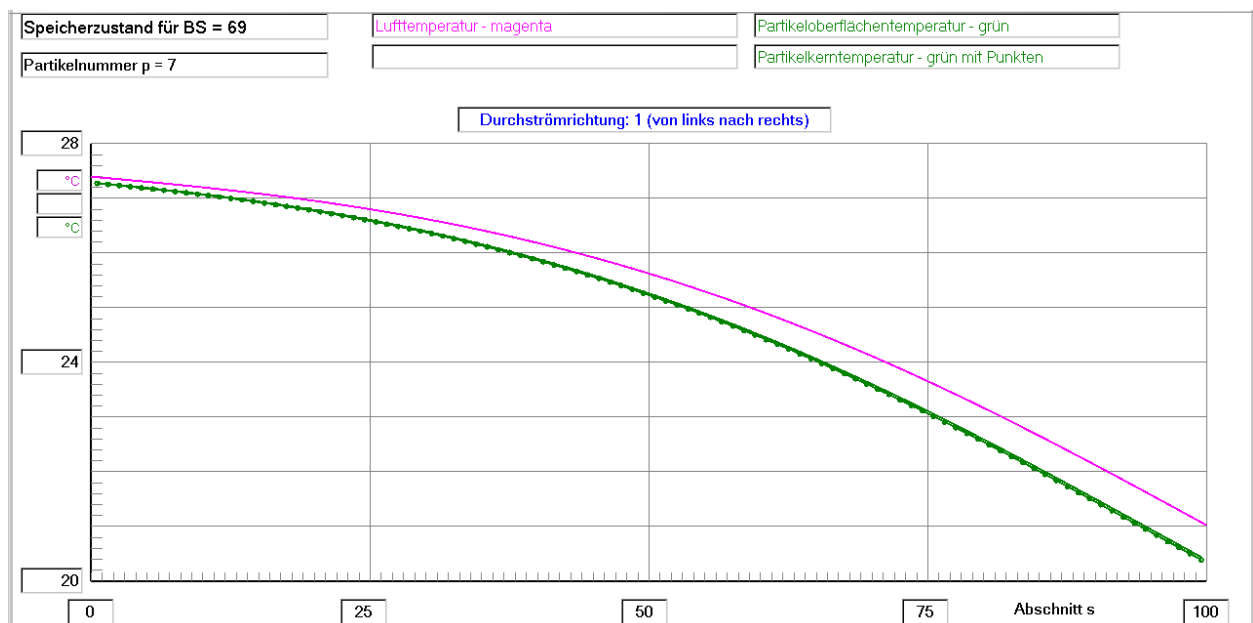


Bild 9.9 Lufttemperatur und ausgewählte Temperaturen des Partikels 7 längs der Speicherabschnitte $s = 1 \dots 100$ mit vergrößertem Ordinatenmaßstab für Beispiel_1

Feststellungen:

- Die in Tabelle 9.3 angegebenen Größen entsprechen den Diagrammwerten. Die Vergrößerung der Temperaturverläufe zeigt, dass die Partikeloberflächentemperatur thermodynamisch richtig zwischen der Partikelkernentemperatur und der Lufttemperatur liegt.

9.2 Beispiel 2 (Entgegengesetzte Durchströmung)

Im Gegensatz zum Beispiel 1 erfolgt für die gesamte Simulationszeit die rückwärtige Speicher-
durchströmung (Richtung = -1). Alle anderen Randbedingungen entsprechen dem Beispiel 1. Die
Zeitverläufe sind unter Entwurfstag 6 gespeichert.

Daten zum Simulationsablauf Maximale Anzahl der Simulationsstunden in h: <input type="text" value="72"/> Beginn der Simulation (Uhrzeit: 0 ... 23): <input type="text" value="18"/> Zeitschrittweite in s (ganzzahlig in 3600 teilbar): <input type="text" value="15"/> Luftvolumenstrom in m³/h (Maximalwert): <input type="text" value="30000"/> Ausgewählter Entwurfstag (ETagfix: 1 ... 20): <input type="text" value="6"/> Starttemperatur in °C für den gesamten Speicher: <input type="text" value="10"/> Bei tStart = 273, Laden einer Temperaturverteilung: <input type="text"/>		Abläufe: 1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben! 2. Daten aus Datei laden oder Neueingabe vornehmen! 3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden! 4. DATENSPEICHERUNG drücken! 5. ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE bzw. ERGEBNISSE oder DIAGRAMM drücken!	Spezielle Untersuchungen zum Zustand längs des Speichers Zustand am Ende der Betriebsstunde (Eingabewert > 0): <input type="text" value="69"/> Gespeichert werden: Lufttemperatur für alle Speicherabschnitte s Abs. Luftfeuchte für alle Speicherabschnitte s Spezielle Betrachtung des Partikels (Eingabewert p = 1 ... pmax): <input type="text" value="7"/> Gespeichert werden: Temperatur in Partikelmitte $t(s, p, i=1, j=1, k=1)$ Temperatur an der Partikeloberfläche $t(s, p, i=1, j=pmax, k=1)$ Speicherung der Ergebnisse in der Datei: <input type="text" value="F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_2\Speicherverlauf.dat"/> <input type="button" value="Diagrammanzeige nach erfolgter Simulation"/>
--	--	---	---

Bild 9.10 Auszug aus Hauptprogramm (Maske 1) für Beispiel_2 mit Bezug auf Entwurfstag 6

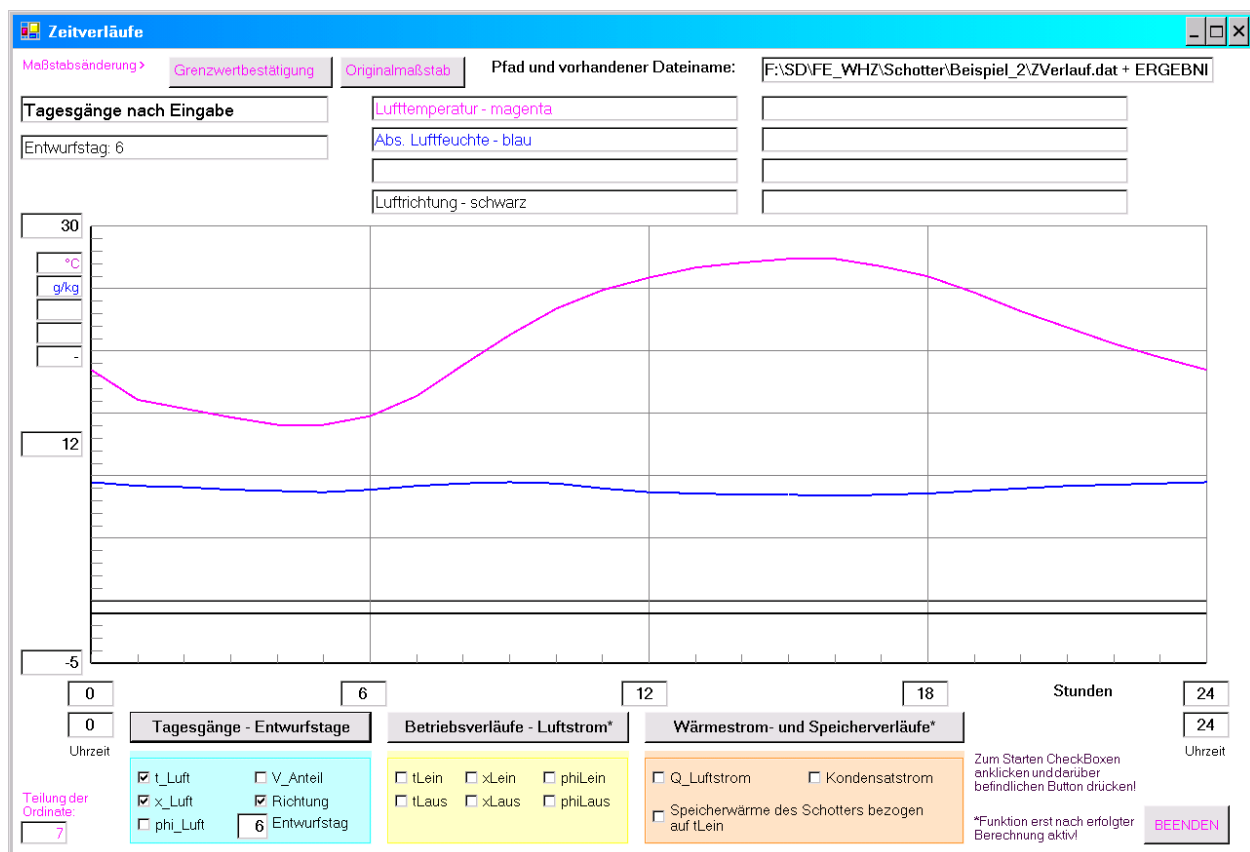


Bild 9.11 Zeitverläufe für Beispiel_2 mit Kennzeichnung der Durchflussrichtung (-1)

Feststellungen:

- Die Simulation liefert völlig deckungsgleiche Ergebnisse zum Beispiel 1, wie der nachfolgende Auszug in Tabelle 9.4 im Vergleich zu Tabelle 9.3 verdeutlicht.

Gleiches gilt für den Tagesverlauf der Luftzustände gemäß Bild 9.12 im Vergleich zu Bild 9.5.

Tabelle 9.4 Auszug des Ergebnisausdruckes

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_2\

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,8
1/19	24,7	10,2	8,8	7,8	44,8	100,0	-32,5	-173,5	-696,7
...									
69/15	27,4	21,0	8,5	8,5	36,9	54,2	0,0	-69,9	-149,8
70/16	27,4	22,8	8,4	8,4	36,5	48,2	0,0	-53,7	-96,2
71/17	26,8	24,2	8,5	8,5	38,3	44,6	0,0	-35,1	-25,7
72/18	26,0	25,4	8,6	8,6	40,6	42,1	0,0	-15,5	37,1

Legende: wie auf Seite 72

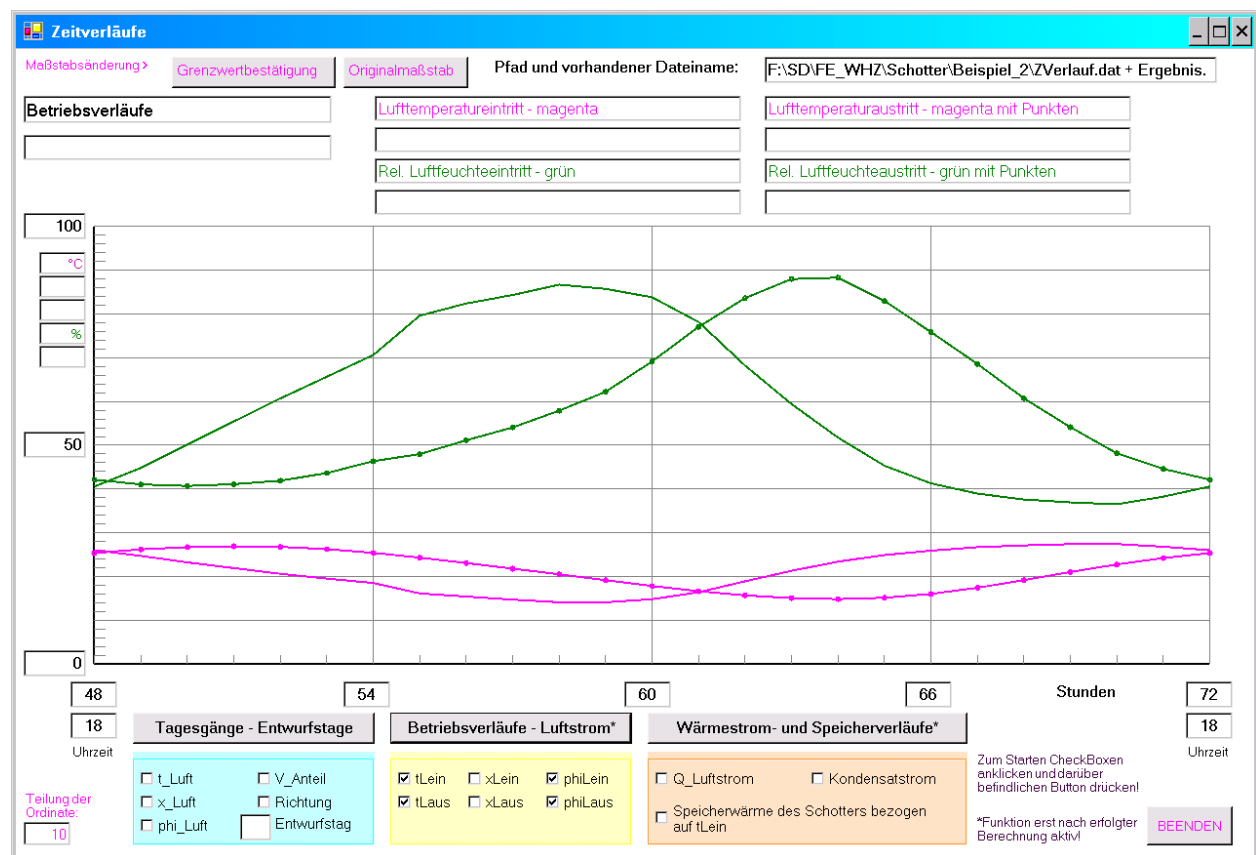


Bild 9.12 Simulationsverläufe für die Luftein- und -austrittstemperatur sowie die relativen Luftfeuchten für Beispiel_2 während der letzten 24 Stunden

Feststellungen:

- Die Verläufe längs des Speichers (Bild 9.13) sind nunmehr entsprechend der geänderten Durchflussrichtung spiegelbildlich zum Bild 9.9.
- Es liegen identische Werte in Abhängigkeit der Durchströmlänge vor!

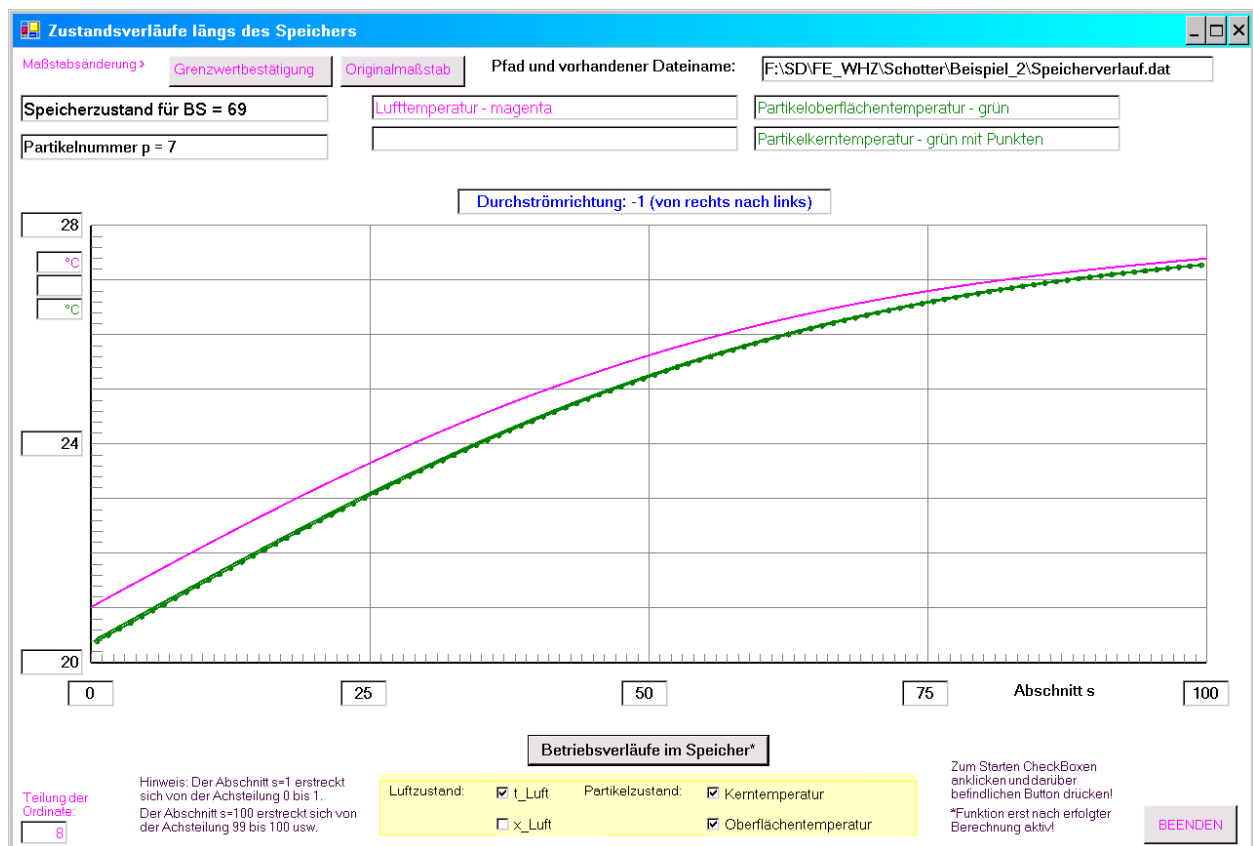


Bild 9.13 Lufttemperatur sowie ausgewählte Temperaturen des Partikels 7 längs der Speicherabschnitte $s = 1 \dots 100$ für Beispiel_2

9.3 Beispiel 3 (Wechselnde Durchströmung und Stillstand)

Unter Beibehalten der bekannten Randbedingungen wird bei Entwurfstag 9 die Durchströmung mehrfach geändert und auch ein Stillstand simuliert. Es sollen sowohl die wärmetechnischen Ergebnisse auf Plausibilität als auch die grafischen Darstellungen beurteilt werden.

Bild 9.14 Auszug aus Hauptprogramm (Maske 1) für Beispiel_3 mit Bezug auf Entwurfstag 9

Tabelle 9.5 Ausdruck der Zeitverläufe für Beispiel_3

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_3\

Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 9:

Tages- stunde	t_L °C	x_L g/kg	ϕ_{iL} %	V_L anteil -	Richtung -
1	16,1	9,2	79,7	1,00	1
2	15,4	9,1	82,4	1,00	1

Tages- stunde	tL °C	xL g/kg	phiL %	VLanteil -	Richtung -
3	14,7	8,9	84,4	1,00	1
4	14,1	8,8	86,7	1,00	1
5	14,1	8,7	85,8	1,00	1
6	14,8	8,9	83,8	1,00	1
7	16,4	9,2	78,2	1,00	1
8	18,9	9,4	68,2	1,00	1
9	21,3	9,5	59,4	1,00	0
10	23,4	9,4	51,7	1,00	0
11	24,9	9,0	45,3	1,00	0
12	25,9	8,7	41,3	1,00	0
13	26,7	8,6	38,9	1,00	-1
14	27,1	8,5	37,6	1,00	-1
15	27,4	8,5	36,9	1,00	-1
16	27,4	8,4	36,5	1,00	-1
17	26,8	8,5	38,3	1,00	-1
18	26,0	8,6	40,6	1,00	-1
19	24,7	8,8	44,8	1,00	1
20	23,2	9,0	50,2	1,00	1
21	21,9	9,2	55,5	1,00	1
22	20,6	9,3	60,7	1,00	1
23	19,5	9,4	65,7	1,00	1
24	18,5	9,5	70,7	1,00	1

Legende: wie auf Seite 70

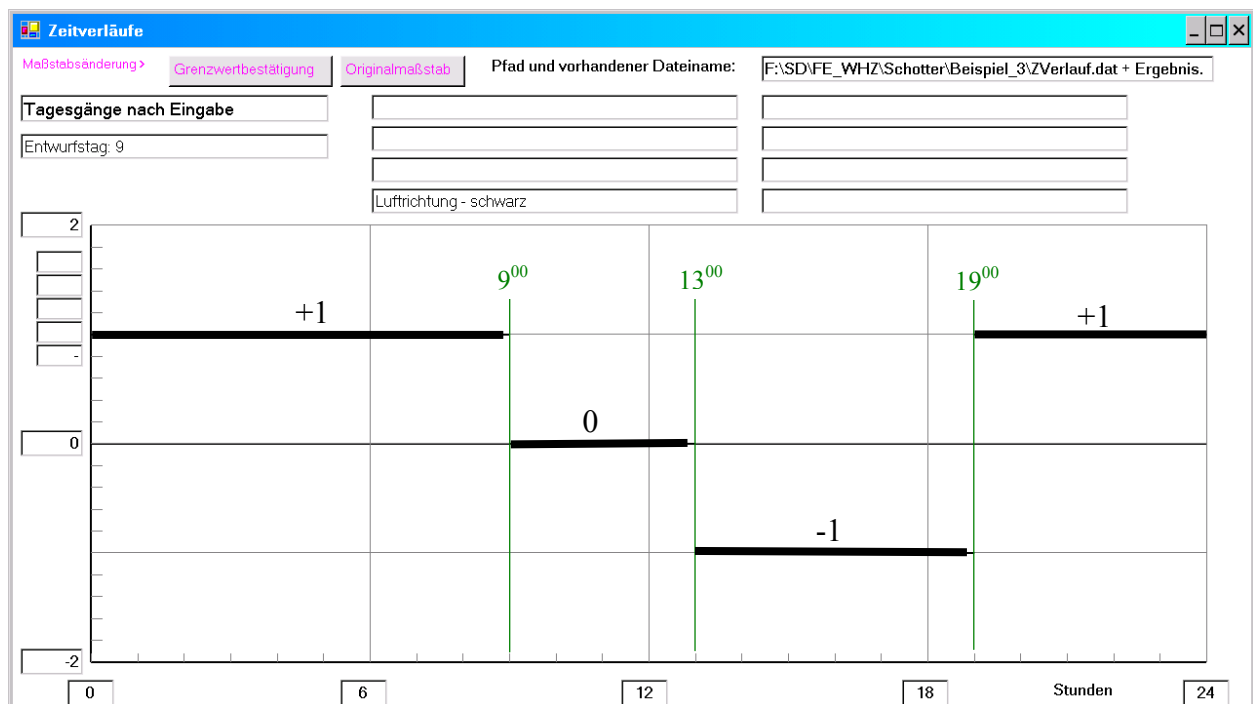


Bild 9.15 Zeitabhängige Durchflussrichtung für Beispiel_3

Feststellung:

- Die Interpretation der Richtungsangabe ist im Bild 9.15 auf der Grundlage des Zeitverlaufs gemäß Tabelle 9.5 richtig vorgenommen worden.

Die Definition der Betriebszustände ist durch Bild 7.7 festgelegt.

Tabelle 9.6 Ergebnisausdruck für Beispiel_3

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_3\

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

Richtung ist zum besseren Verständnis manuell ergänzt worden!

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh	Richtung
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,8	
1/19	24,7	10,2	8,8	7,8	44,8	100,0	-32,5	-173,5	-696,7	-1
2/20	23,2	16,3	9,0	8,5	50,1	72,9	-21,3	-58,5	-549,4	1
3/21	21,9	12,9	9,2	8,9	55,5	94,8	-13,8	-91,9	-380,5	1
4/22	20,6	12,6	9,3	9,2	60,7	100,0	-6,4	-91,3	-212,3	1
5/23	19,5	13,2	9,4	9,4	65,7	98,2	-0,9	-73,1	-74,0	1
6/24	18,5	15,0	9,5	9,5	70,6	88,0	0,0	-50,1	35,3	1
7/ 1	16,1	17,5	9,2	9,2	79,6	73,0	0,0	-10,4	187,4	1
8/ 2	15,4	19,4	9,1	9,1	82,4	64,2	0,0	28,1	201,2	1
9/ 3	14,7	20,1	8,9	8,9	84,4	60,0	0,0	48,6	194,0	1
10/ 4	14,1	19,8	8,8	8,8	86,7	60,4	0,0	57,5	172,0	1
11/ 5	14,1	18,9	8,7	8,7	85,8	63,1	0,0	54,3	117,9	1
12/ 6	14,8	17,7	8,9	8,9	83,8	69,5	0,0	39,7	36,9	1
13/ 7	16,4	16,6	9,2	9,2	78,2	77,2	0,0	15,9	-73,5	1
14/ 8	18,9	15,7	9,4	9,4	68,2	83,7	0,0	-15,5	-205,7	1
15/ 9	21,3	15,0	9,5	9,5	59,4	88,0	0,0	-47,8	-299,8	1
16/10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
17/11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
18/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
19/13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
20/14	27,1	18,0	8,5	8,5	37,6	65,2	0,0	-76,7	-566,9	-1
21/15	27,4	16,5	8,5	8,5	36,9	71,8	0,0	-98,2	-486,5	-1
22/16	27,4	15,8	8,4	8,4	36,5	74,2	0,0	-110,8	-375,8	-1
23/17	26,8	16,4	8,5	8,5	38,3	72,4	0,0	-109,0	-231,4	-1
24/18	26,0	18,4	8,6	8,6	40,6	64,4	0,0	-89,4	-94,7	-1
25/19	24,7	21,3	8,8	8,8	44,8	55,2	0,0	-54,5	36,6	-1
26/20	23,2	26,2	9,0	9,0	50,1	42,0	0,0	17,9	107,4	1
27/21	21,9	26,4	9,2	9,2	55,5	42,3	0,0	37,8	146,5	1
28/22	20,6	26,0	9,3	9,3	60,7	43,9	0,0	50,0	173,5	1
29/23	19,5	25,0	9,4	9,4	65,7	47,0	0,0	54,6	184,1	1
30/24	18,5	24,0	9,5	9,5	70,6	50,4	0,0	55,2	188,0	1
31/ 1	16,1	23,2	9,2	9,2	79,6	51,3	0,0	63,6	266,1	
32/ 2	15,4	22,4	9,1	9,1	82,4	53,3	0,0	71,6	236,4	
33/ 3	14,7	21,4	8,9	8,9	84,4	55,2	0,0	70,0	207,7	
34/ 4	14,1	20,3	8,8	8,8	86,7	58,4	0,0	66,5	176,8	
35/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,4	0,0	57,6	119,4	
36/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,2	0,0	40,8	37,3	
37/ 7	16,4	16,6	9,2	9,2	78,2	77,1	0,0	16,2	-73,3	
38/ 8	18,9	15,7	9,4	9,4	68,2	83,7	0,0	-15,4	-205,6	
39/ 9	21,3	15,0	9,5	9,5	59,4	88,0	0,0	-47,8	-299,8	
40/10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
41/11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
42/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
43/13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
44/14	27,1	18,0	8,5	8,5	37,6	65,2	0,0	-76,7	-566,8	
45/15	27,4	16,5	8,5	8,5	36,9	71,8	0,0	-98,2	-486,5	
46/16	27,4	15,8	8,4	8,4	36,5	74,2	0,0	-110,8	-375,8	
47/17	26,8	16,4	8,5	8,5	38,3	72,4	0,0	-109,0	-231,4	
48/18	26,0	18,4	8,6	8,6	40,6	64,4	0,0	-89,4	-94,7	
49/19	24,7	21,3	8,8	8,8	44,8	55,2	0,0	-54,5	36,6	
50/20	23,2	26,2	9,0	9,0	50,1	42,0	0,0	17,9	107,4	
51/21	21,9	26,4	9,2	9,2	55,5	42,3	0,0	37,8	146,5	
52/22	20,6	26,0	9,3	9,3	60,7	43,9	0,0	50,0	173,5	
53/23	19,5	25,0	9,4	9,4	65,7	47,0	0,0	54,6	184,1	
54/24	18,5	24,0	9,5	9,5	70,6	50,4	0,0	55,2	188,0	
55/ 1	16,1	23,2	9,2	9,2	79,6	51,3	0,0	63,6	266,1	
56/ 2	15,4	22,4	9,1	9,1	82,4	53,3	0,0	71,6	236,4	
57/ 3	14,7	21,4	8,9	8,9	84,4	55,2	0,0	70,0	207,7	
58/ 4	14,1	20,3	8,8	8,8	86,7	58,4	0,0	66,5	176,8	

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
59/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,4	0,0	57,6	119,4
60/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,2	0,0	40,8	37,3
61/ 7	16,4	16,6	9,2	9,2	78,2	77,1	0,0	16,2	-73,3
62/ 8	18,9	15,7	9,4	9,4	68,2	83,7	0,0	-15,4	-205,6
63/ 9	21,3	15,0	9,5	9,5	59,4	88,0	0,0	-47,8	-299,8
64/10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65/11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67/13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68/14	27,1	18,0	8,5	8,5	37,6	65,2	0,0	-76,7	-566,8
69/15	27,4	16,5	8,5	8,5	36,9	71,8	0,0	-98,2	-486,5
70/16	27,4	15,8	8,4	8,4	36,5	74,2	0,0	-110,8	-375,8
71/17	26,8	16,4	8,5	8,5	38,3	72,4	0,0	-109,0	-231,4
72/18	26,0	18,4	8,6	8,6	40,6	64,4	0,0	-89,4	-94,7

Legende: wie auf Seite 72

Feststellungen:

- Die Stillstandszeiten (Richtung = 0) werden korrekt wiedergegeben.
- Wenn der Speicher nicht von Luft durchströmt wird, ändert sich zwar die Temperatur innerhalb der Partikel, es geht aber kein Wärmestrom an die Luft in den Hohlräumen. Somit bleibt die Speicherwärme im Speicher unverändert.

Kontrolle:

Die Überprüfung der Wärmebilanz betrachtet die Zustände am Ende der 63. und 68. Betriebsstunde:

$$Q_{\text{Speicher}}(9^{00} \text{ Uhr}) = -299,8 \text{ kWh} \quad Q_{\text{Speicher}}(14^{00} \text{ Uhr}) = -566,8 \text{ kWh}.$$

In der Zwischenzeit – innerhalb der 68. Betriebsstunde – wurde von der Luft die Wärme von 76,7 kWh aufgenommen.

Mit der Wärmekapazität des gesamten Schotters im Speicher

$$C_{\text{Speicher}} = m_{\text{Speicher}} c = 250614 \cdot 850 / 3600000 \text{ kWh/K} = 59,2 \text{ kWh/K}$$

ergibt sich die mittlere Schottertemperatur zu

$$t_{\text{Schotter,mittel}} = t_{\text{Luft,Eintritt}} + Q_{\text{Speicher}} / C_{\text{Speicher}}.$$

Somit gelten um 9⁰⁰ Uhr

$$t_{\text{Schotter,mittel}} = 21,3 \text{ °C} - 299,8 / 59,2 \text{ K} = 16,24 \text{ °C}$$

und um 14⁰⁰ Uhr

$$t_{\text{Schotter,mittel}} = 27,1 \text{ °C} - 566,8 / 59,2 \text{ K} = 17,53 \text{ °C}.$$

Der Schotter hat sich somit um 1,29 K erwärmt, d. h., in der 68. Betriebsstunde sind von der Luft

$$Q_{\text{Luft}} = 59,2 \cdot 1,29 \text{ kWh} \approx 76,4 \text{ kWh}$$

aufgenommen worden. Damit besteht im Rahmen der Rechengenauigkeit Übereinstimmung.

Der Speicher hat während des Stillstandes keine Wärme verloren.

- Modellgemäß erfolgt innerhalb der Stillstandszeit ein Temperatúrausgleich innerhalb der Partikel, jedoch nicht innerhalb der Speicherschichten s.

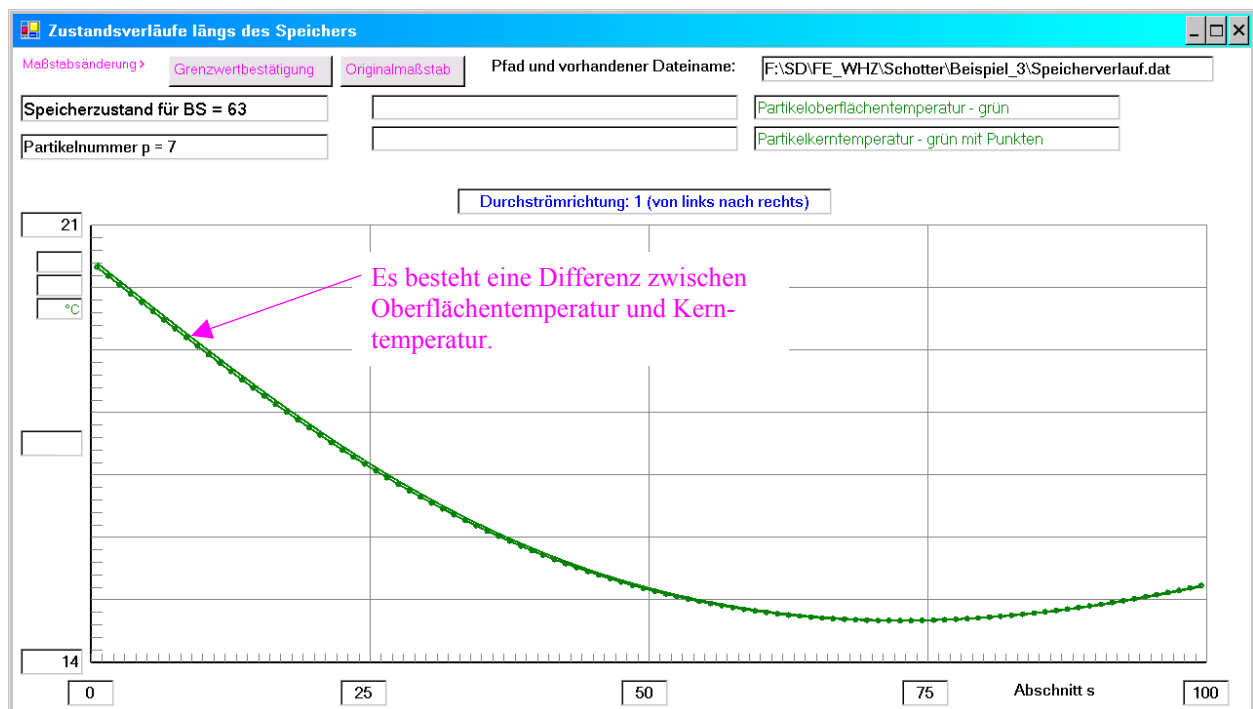


Bild 9.16a Temperaturen des Partikels 7 am Ende der 63. Betriebsstunde (Beginn des Stillstandes)

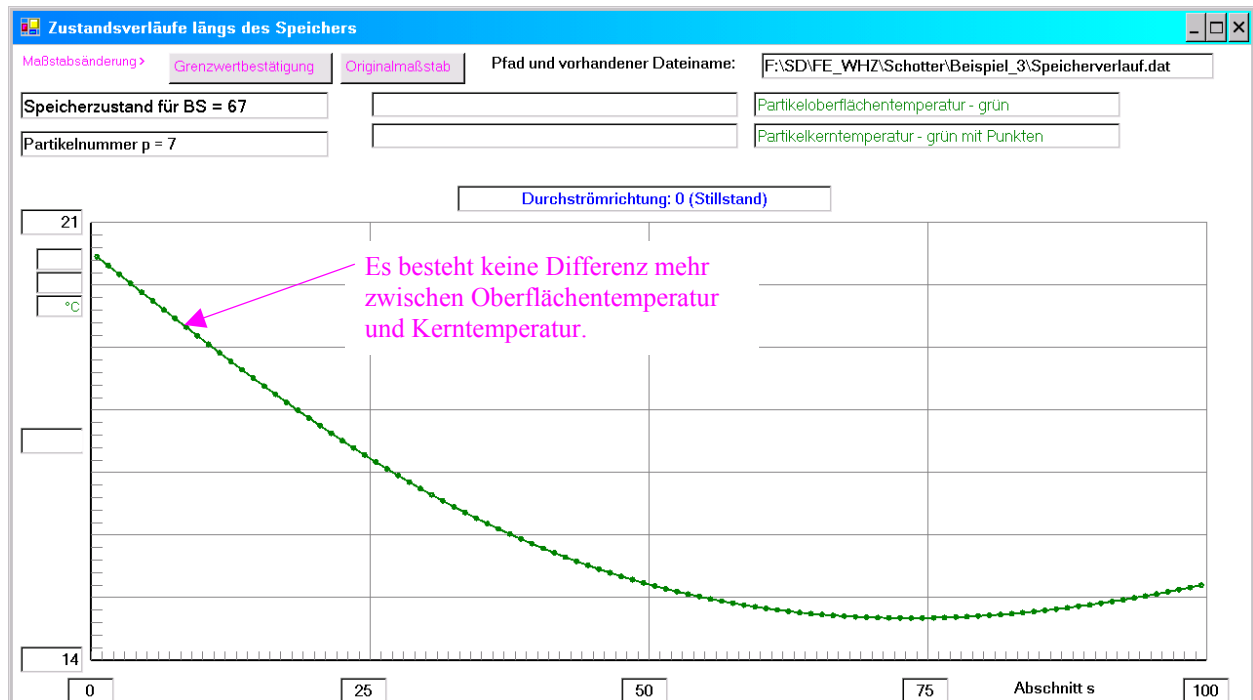


Bild 9.16b Temperaturen des Partikels 7 am Ende der 67. Betriebsstunde (Ende des Stillstandes)

Die Bilder 9.16a und 9.16b bestätigen den erfolgten Temperatúrausgleich innerhalb des Partikels 7, wobei sich die mittlere Partikeltemperatur nicht änderte.

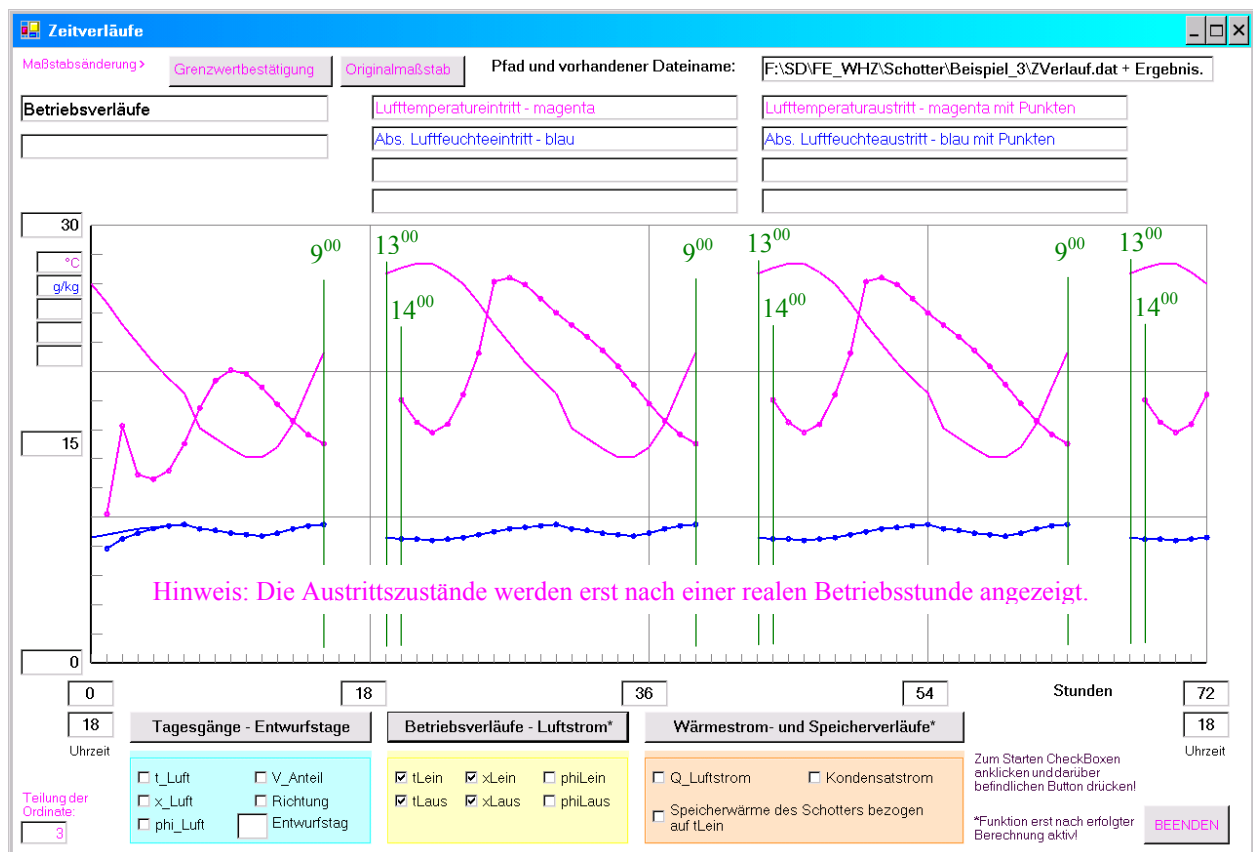


Bild 9.17 Simulationsverläufe für die Luftein- und -austrittstemperatur sowie die absoluten Luftfeuchten für Beispiel_3

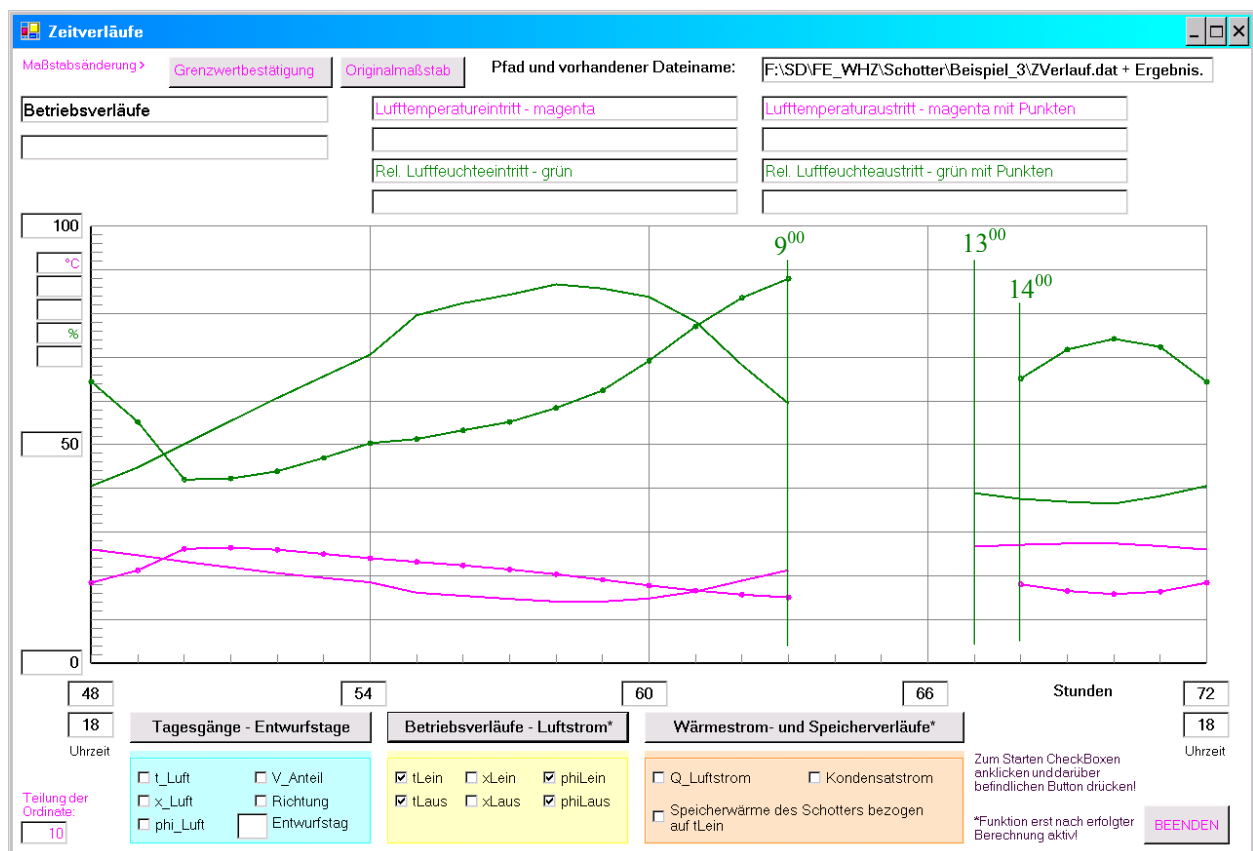


Bild 9.17a Simulationsverläufe für die Luftein- und -austrittstemperatur sowie die relativen Luftfeuchten für Beispiel_3 während der letzten 24 Stunden

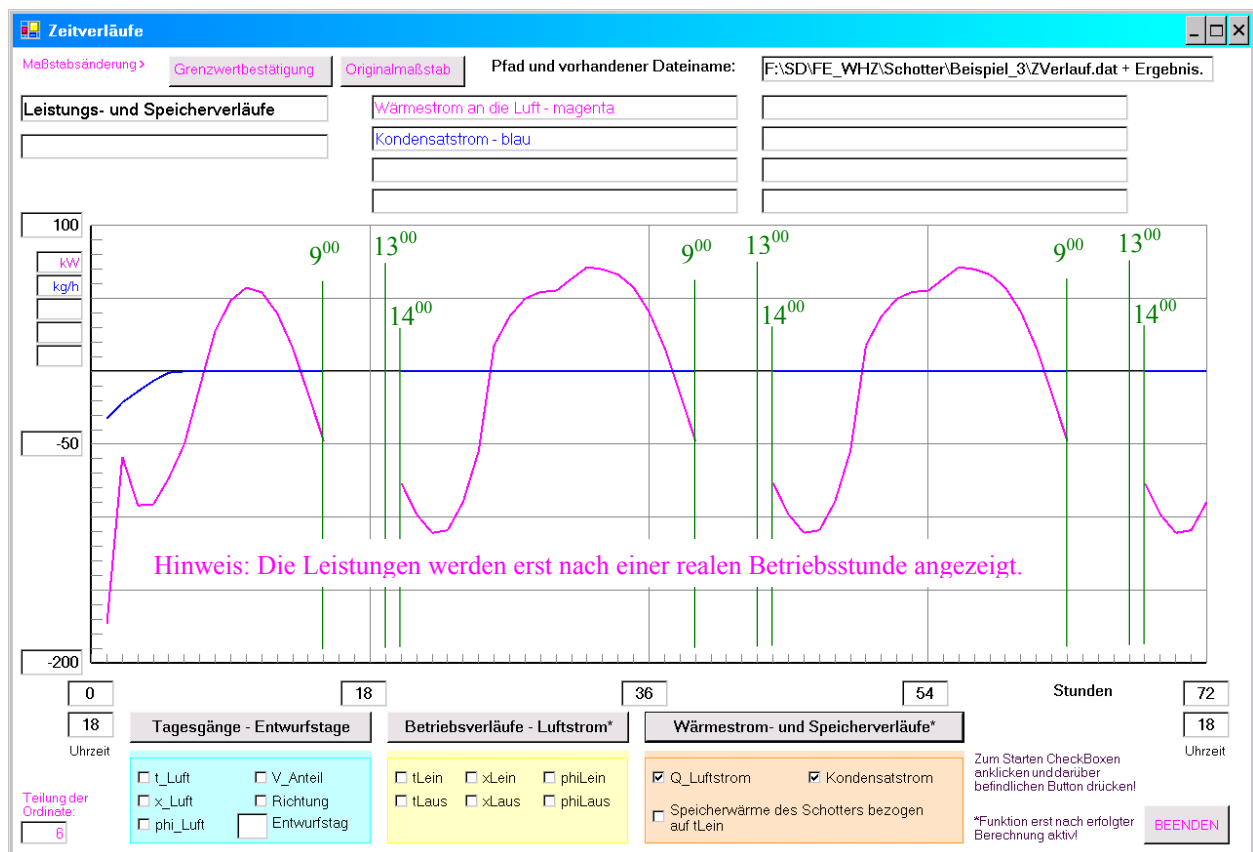


Bild 9.18 Simulationsverläufe für den Wärme- und Kondensatstrom für Beispiel_3

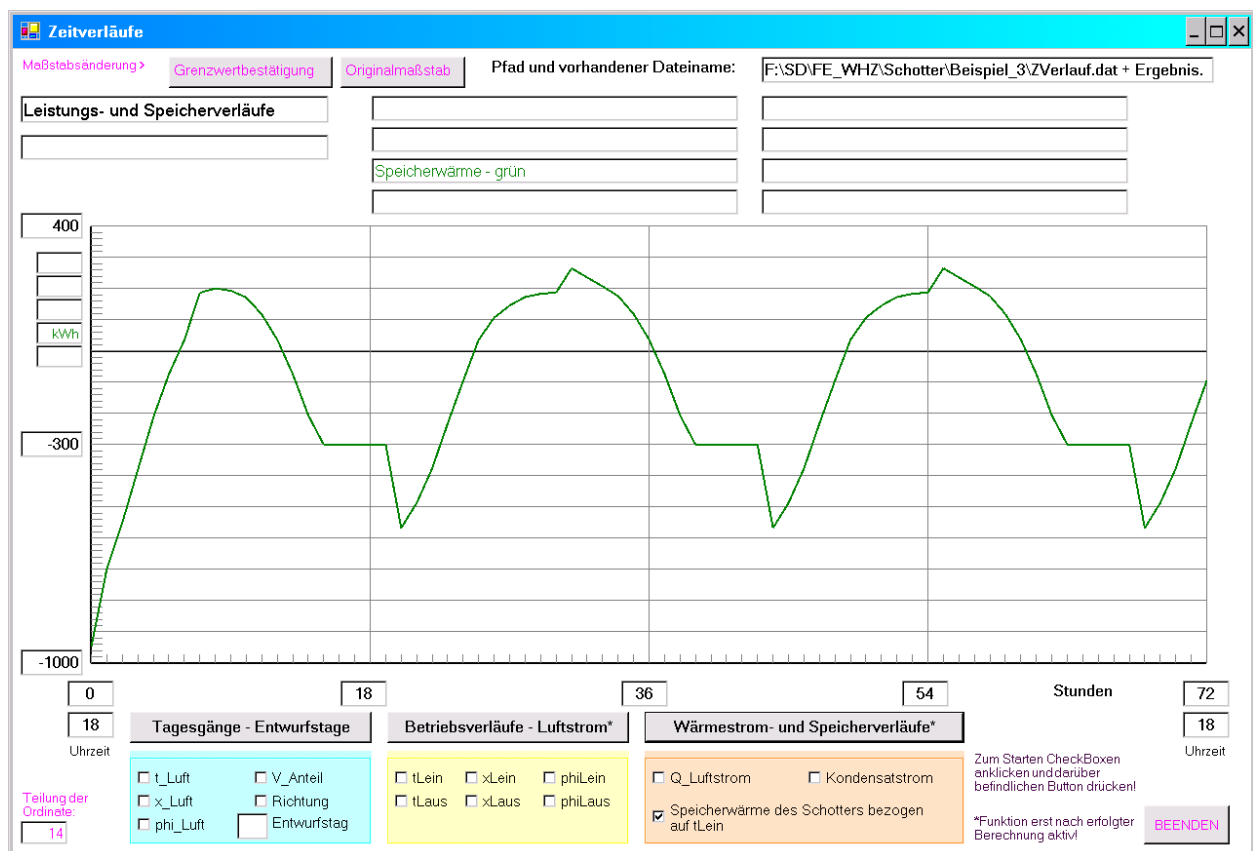


Bild 9.19 Simulationsverlauf der auf die Lufteintrittstemperatur bezogenen Speicherwärme für Beispiel_3

Feststellungen:

- Die Stillstandszeiten (Richtung = 0) werden in den Diagrammen richtig wiedergegeben. Zustandsgrößen und Leistungen nach Beginn der Simulation und nach einem Stillstand können erst nach einer realen Betriebsstunde (Luftdurchfluss) benannt werden. Die Eingangsgrößen – z. B. die Lufteintrittstemperatur – werden dagegen bereits bei Beginn des Luftdurchsatzes angezeigt.

Somit erfolgen alle Diagrammdarstellungen zeitgenau.

- Bei einem Richtungswechsel des Luftstromes entstehen mitunter große Änderungen bezüglich der Austrittsgrößen und der Leistungen. Dies ist grundsätzlich logisch. Es kann beispielsweise anhand der Bilder 9.20a bis 9.20c erklärt werden.

Beim Durchfluss von rechts nach links ergeben sich am Ende der 1. Betriebsstunde die Verläufe gemäß Bild 9.20a. Aufgrund der Starttemperatur von 10 °C und der großen Wärmeübertragerfläche nähert sich die Luftaustrittstemperatur der Schottertemperatur im linken Speicherbereich stark an. Auf der rechten Speicherseite (Lufteintritt während der 1. Betriebsstunde) hat sich das Speichermaterial bereits stark erwärmt.

Nach dem Richtungswechsel der Luftdurchströmung ergibt sich das Bild 20b. Die Luft mit der relativ hohen Lufteintrittstemperatur von etwa 23 °C erwärmt das Speichermaterial im lin-

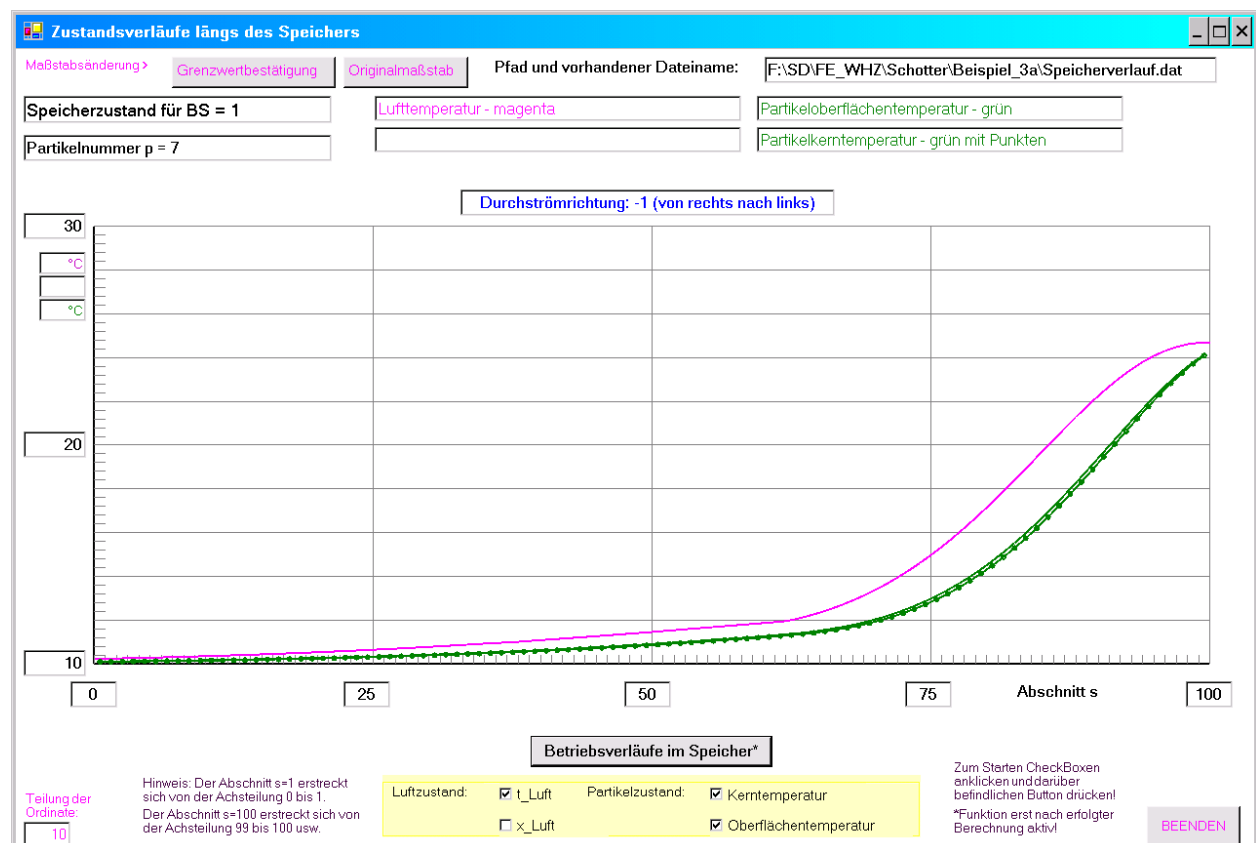


Bild 20a Temperaturverläufe längs des Speichers am Ende der 1. Betriebsstunde

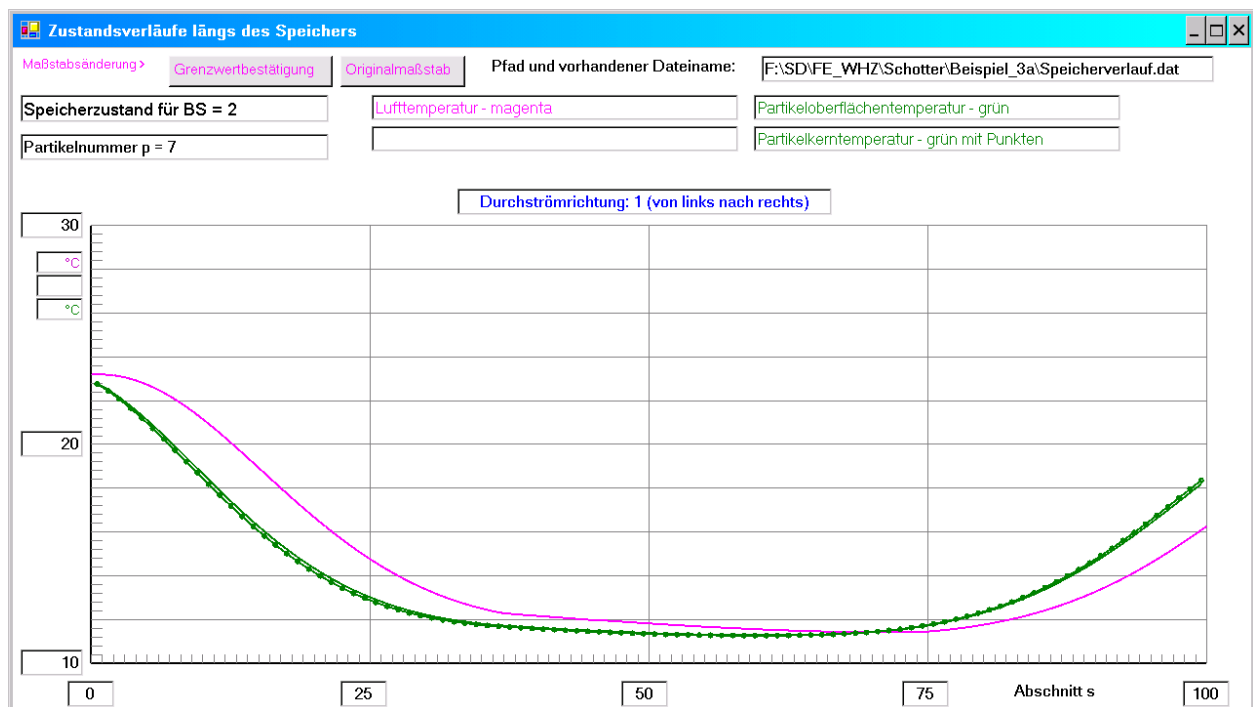


Bild 20b Temperaturverläufe längs des Speichers am Ende der 2. Betriebsstunde nach erfolgtem Richtungswechsel

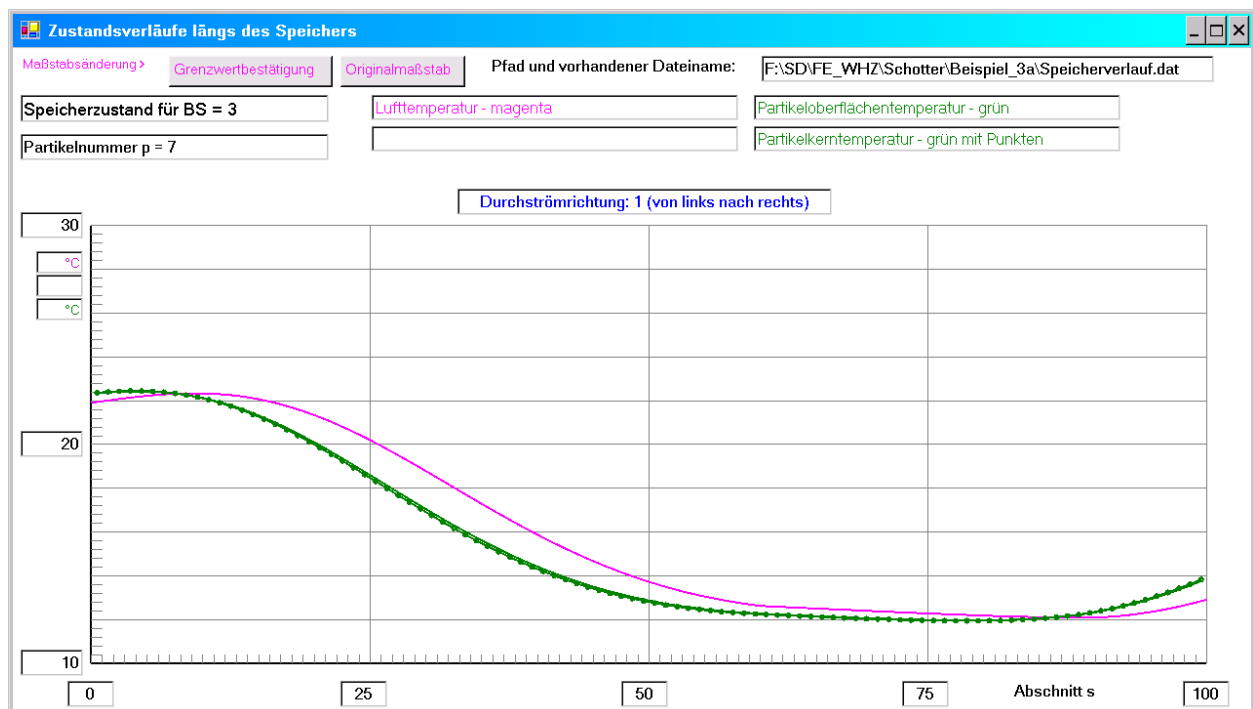


Bild 20c Temperaturverläufe längs des Speichers am Ende der 3. Betriebsstunde unter Beibehalten der Durchflussrichtung

ken Bereich. Sie sinkt dann auf unter 12 °C ab und erfährt anschließend eine Temperaturerhöhung beim Durchgang durch den rechten Speicherbereich (Rückerwärmung), der während der 1. Betriebsstunde bereits auf eine höhere Temperatur gebracht wurde. Folglich verringert sich die Kühlung der Luft beträchtlich gegenüber der Variante mit gleichbleibender Durchströmungsrichtung. Nach Tabelle 9.6 und Bild 9.18 gilt für die 2. Betriebsstunde $\dot{Q}_{\text{Luft}} = -58,5 \text{ kW}$,

während im Beispiel 1 zu dieser Zeit die Leistung $\dot{Q}_{\text{Luft}} = -151,7 \text{ kW}$ galt. Nach der 3. Betriebsstunde schwächt sich die Rück erwärmung des Luftstromes ab (Bild 20c).

Die Umschaltung der Durchflussrichtung wirkt in diesem Fall thermodynamisch negativ, die Ergebnisse sind plausibel.

9.4 Beispiel 4 (Reduzierter Luftvolumenstrom)

Um zu überprüfen, ob die Eingabe eines reduzierten Volumenstromes bei der Simulation richtige Beachtung findet, wird Beispiel 1 verwendet, der Luftstrom auf $60000 \text{ m}^3/\text{h}$ gesetzt und gleichzeitig eine Reduzierung des Luftvolumenstromes ($V_{\text{Lanteil}}(\text{Tagesstunde}) = 0,5$) vorgenommen. Die Zeitverläufe werden unter Entwurfstag = 12 gespeichert.

Bild 9.21 Zeitverläufe (Maske 2) für Beispiel_4

Bild 9.22 Auszug aus Hauptprogramm (Maske 1) für Beispiel_4

Das Ergebnis ist aus Tabelle 9.7 ersichtlich.

Tabelle 9.7 Ergebnisausdruck für Beispiel_4

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_4\

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung
Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,8
1/19	24,7	10,2	8,8	7,8	44,8	100,0	-32,5	-173,5	-696,7
2/20	23,2	11,2	9,0	8,4	50,1	100,0	-28,4	-151,7	-456,3
3/21	21,9	12,2	9,2	9,0	55,5	100,0	-14,4	-117,9	-261,4
4/22	20,6	13,0	9,3	9,3	60,7	98,4	-2,4	-88,4	-96,0
5/23	19,5	15,2	9,4	9,4	65,7	86,5	0,0	-61,0	30,1
6/24	18,5	18,0	9,5	9,5	70,6	72,8	0,0	-24,2	113,5
7/ 1	16,1	20,2	9,2	9,2	79,6	61,4	0,0	19,5	235,7
8/ 2	15,4	21,2	9,1	9,1	82,4	57,3	0,0	51,7	225,9
9/ 3	14,7	21,0	8,9	8,9	84,4	56,6	0,0	62,6	204,6
10/ 4	14,1	20,2	8,8	8,8	86,7	58,8	0,0	64,2	176,0
11/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,5	0,0	56,9	119,2
12/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,3	0,0	40,7	37,3

Legende: {Ende der Betriebsstunde = 1 Zeitschritt vor Erreichen der vollen Stunde!}

BS Simulationsstunde
tLein Lufteintrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde
tLaus Luftaustrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde
xLein absolute Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
xLaus absolute Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
phiLein relative Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
phiLaus relative Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
mKon ausgefallener Kondensatmassestrom während der Betriebsstunde
QLuft mittlerer Wärmestrom während der Betriebsstunde an die strömende Luft
QSpeicher Speicherwärme im Schotter bezogen auf die Lufteintrittstemperatur
am Ende der Betriebsstunde

Hinweis zu den Ergebnissen: - bedeutet Stillstand des Speichers

Das letzte Temperaturfeld ist gespeichert in der Datei:

F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_4\Speicherfeld.dat

Feststellung:

- Die Ergebnisse stimmen mit den Originalwerten der Tabelle 9.3 überein.

Somit wird die zeitabhängige Volumenreduzierung des Luftstromes im Simulationsmodell korrekt beachtet.

9.5 Beispiel 5 (Starttemperatur gemäß Datei)

Es wird Beispiel 1 als nunmehr Beispiel 5 verwendet, bis zur 5. Betriebsstunde simuliert und die automatisch gefüllte Datei "Speicherfeld.dat" dann beim Start des Beispiels 5a als Starttemperaturverteilung eingelesen. Die Weiterrechnung ab der entsprechenden Tageszeit muss die Übereinstimmung mit Beispiel 1 ergeben.

Daten zum Simulationsablauf Maximale Anzahl der Simulationsstunden in h: <input type="text" value="5"/> Beginn der Simulation (Uhrzeit: 0 ... 23): <input type="text" value="18"/> Zeitschrittweite in s (ganzzahlig in 3600 teilbar): <input type="text" value="15"/> Luftvolumenstrom in m³/h (Maximalwert): <input type="text" value="30000"/> Ausgewählter Entwurfstag (ETagfix: 1 ... 20): <input type="text" value="3"/> Starttemperatur in °C für den gesamten Speicher: <input type="text" value="10"/> Bei tStart = -273, Laden einer Temperaturverteilung: <input type="text" value="F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_5\Speicherfeld.dat"/>	Abläufe: 1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben! 2. Daten aus Datei laden oder Neueingabe vornehmen! 3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden! 4. DATENSPEICHERUNG drücken! 5. ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE bzw. ERGEBNISSE oder DIAGRAMM drücken!	Spezielle Untersuchungen zum Zustand längs des Speichers Zustand am Ende der Betriebsstunde (Eingabewert > 0): <input type="text" value="0"/> Gespeichert werden: Lufttemperatur für alle Speicherabschnitte s Abs. Luftfeuchte für alle Speicherabschnitte s Spezielle Betrachtung des Partikels (Eingabewert p = 1 ... pmax): <input type="text" value="0"/> Gespeichert werden: Temperatur in Partikelmitte t(s, p, i=1, j=1, k=1) Temperatur an der Partikeloberfläche t(s, p, i=1, j=pmax, k=1) Speicherung der Ergebnisse in der Datei: <input type="text" value="F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_5\Speicherverlauf.dat"/> <input type="button" value="Diagrammanzeige nach erfolgter Simulation"/>
--	---	--

Bild 9.23 Auszug aus Hauptprogramm (Maske 1) für Beispiel_5

Tabelle 9.8 Ergebnisausdruck für Beispiel_5

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_5\

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,8
1/19	24,7	10,2	8,8	7,8	44,8	100,0	-32,5	-173,5	-696,7
2/20	23,2	11,2	9,0	8,4	50,1	100,0	-28,4	-151,7	-456,3
3/21	21,9	12,2	9,2	9,0	55,5	100,0	-14,4	-117,9	-261,4
4/22	20,6	13,0	9,3	9,3	60,7	98,4	-2,4	-88,4	-96,0
5/23	19,5	15,2	9,4	9,4	65,7	86,5	0,0	-61,0	30,1

Legende: wie auf Seite 90

Das letzte Temperaturfeld ist gespeichert in der Datei:

F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_5\Speicherfeld.dat

Daten zum Simulationsablauf Maximale Anzahl der Simulationsstunden in h: <input type="text" value="7"/> Beginn der Simulation (Uhrzeit: 0 ... 23): <input type="text" value="23"/> Zeitschrittweite in s (ganzzahlig in 3600 teilbar): <input type="text" value="15"/> Luftvolumenstrom in m³/h (Maximalwert): <input type="text" value="30000"/> Ausgewählter Entwurfstag (ETagfix: 1 ... 20): <input type="text" value="3"/> Starttemperatur in °C für den gesamten Speicher: <input type="text" value="-273"/> Bei tStart = -273, Laden einer Temperaturverteilung: <input type="text" value="F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_5a\Speicherfeld.dat"/>	Abläufe: 1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben! 2. Daten aus Datei laden oder Neueingabe vornehmen! 3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden! 4. DATENSPEICHERUNG drücken! 5. ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE bzw. ERGEBNISSE oder DIAGRAMM drücken!	Spezielle Untersuchungen zum Zustand längs des Speichers Zustand am Ende der Betriebsstunde (Eingabewert > 0): <input type="text" value="69"/> Gespeichert werden: Lufttemperatur für alle Speicherabschnitte s Abs. Luftfeuchte für alle Speicherabschnitte s Spezielle Betrachtung des Partikels (Eingabewert p = 1 ... pmax): <input type="text" value="7"/> Gespeichert werden: Temperatur in Partikelmitte t(s, p, i=1, j=1, k=1) Temperatur an der Partikeloberfläche t(s, p, i=1, j=pmax, k=1) Speicherung der Ergebnisse in der Datei: <input type="text" value="F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_5a\Speicherverlauf.dat"/> <input type="button" value="Diagrammanzeige nach erfolgter Simulation"/>
---	---	--

Bild 9.24 Auszug aus Hauptprogramm (Maske 1) für Beispiel_5a

Tabelle 9.9 Ergebnisausdruck für Beispiel_5

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_5A\

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/23	19,5	-	9,4	-	65,7	-	-	-	30,3
1/24	18,5	18,0	9,5	9,5	70,6	72,8	0,0	-24,2	113,5
2/ 1	16,1	20,2	9,2	9,2	79,6	61,4	0,0	19,5	235,7
3/ 2	15,4	21,2	9,1	9,1	82,4	57,3	0,0	51,7	225,9
4/ 3	14,7	21,0	8,9	8,9	84,4	56,6	0,0	62,6	204,6
5/ 4	14,1	20,2	8,8	8,8	86,7	58,8	0,0	64,2	176,0
6/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,5	0,0	56,9	119,2
7/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,3	0,0	40,7	37,3

Feststellungen:

- Die Ergebnisse stimmen mit den Originalwerten der Tabelle 9.3 vollkommen überein. Dies betrifft die Simulation von 18⁰⁰ Uhr bis 23⁰⁰ Uhr und weiter die Simulation von 23⁰⁰ Uhr bis 6⁰⁰ Uhr.
- Die Besonderheit des Neustarts zeigt, dass die Lufteintrittstemperatur und die Eintrittsfeuchte für 23⁰⁰ Uhr wiederholt werden, jedoch nur als Startwert zur neuen Betriebsstunde 0, ohne aber ein Ergebnis anzugeben. Ergebnisse werden richtigerweise erst am Ende der 1. Betriebsstunde (neu) gezeigt. Sie stimmen mit den Originalwerten lückenlos überein.

Eine kleine Abweichung findet man bei der Speicherwärme Q_{Speicher} zwischen der 5. Betriebsstunde (alt) und der 0. Betriebsstunde (neu). Dies ist logisch erklärbar. Die Simulationsergebnisse werden am Ende einer Betriebsstunde (Dtau vor der vollen Stunde) gemäß Bild 5.3 ermittelt. Somit gilt als zugehöriger Wert in diesem Fall $Q_{\text{Speicher}}(5) = 30,1 \text{ kWh}$. Beim Programmstart (zur vollen Stunde) wird eine "Bestandsaufnahme" vorgenommen. In diesem Fall gilt $Q_{\text{Speicher}}(0) = 30,3 \text{ kWh}$. Der Bilanzzeitpunkt liegt im vorliegenden Beispiel somit um $Dtau = 15 \text{ s}$ später und erklärt den Unterschied infolge der geringfügig geänderten Lufteintrittstemperatur (Bezugsgröße).

Die Arbeitsweise mit Einlesen eines Temperaturfeldes zu Beginn der Simulation arbeitet richtig. Damit ist es auch möglich, mehrere Entwurfstage in Folge abzuarbeiten.

10 Diskretisierungseinflüsse auf das Simulationsergebnis

Die Unterteilung des Speichers in **Längenabschnitte** s_{max} und die Simulationsstunde in **Zeitschrittweiten** $Dtau$ sind die hauptsächlich frei wählbaren Diskretisierungen bei der Simulation. Die **Gittergestaltung** der Partikel ist dagegen programmintern festgelegt.

Im Weiteren erfolgen Gegenüberstellungen verschiedener Variationen der genannten Diskretisierungsgrößen mit dem Beispiel 1.

	Speicherunterteilung s_{max}	Zeitschrittweite $Dtau$	Partikelgitter
Beispiel 1	100	15 s	normal
Beispiel 6	50	15 s	normal
Beispiel 7	100	10 s	normal
Beispiel 8	50	10 s	normal
Beispiel 9	100	4 s ^{*)}	doppelt fein ^{*)}

^{*)}Die feinere Unterteilung verlangt gleichzeitig auch eine Herabsetzung der Zeitschrittweite nach Gl. (3.15).

Es werden die Simulationsergebnisse (Stundenwerte) für die ersten 12 Betriebsstunden angegeben.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_1\

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,8
1/19	24,7	10,2	8,8	7,8	44,8	100,0	-32,5	-173,5	-696,7
2/20	23,2	11,2	9,0	8,4	50,1	100,0	-28,4	-151,7	-456,3
3/21	21,9	12,2	9,2	9,0	55,5	100,0	-14,4	-117,9	-261,4
4/22	20,6	13,0	9,3	9,3	60,7	98,4	-2,4	-88,4	-96,0
5/23	19,5	15,2	9,4	9,4	65,7	86,5	0,0	-61,0	30,1
6/24	18,5	18,0	9,5	9,5	70,6	72,8	0,0	-24,2	113,5
7/ 1	16,1	20,2	9,2	9,2	79,6	61,4	0,0	19,5	235,7
8/ 2	15,4	21,2	9,1	9,1	82,4	57,3	0,0	51,7	225,9
9/ 3	14,7	21,0	8,9	8,9	84,4	56,6	0,0	62,6	204,6
10/ 4	14,1	20,2	8,8	8,8	86,7	58,8	0,0	64,2	176,0
11/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,5	0,0	56,9	119,2
12/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,3	0,0	40,7	37,3

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_6\

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,7
1/19	24,7	10,2	8,8	7,8	44,8	100,0	-32,7	-173,7	-696,4
2/20	23,2	11,1	9,0	8,3	50,1	100,0	-29,3	-152,8	-454,9
3/21	21,9	12,2	9,2	8,9	55,5	100,0	-15,5	-119,3	-258,7
4/22	20,6	12,9	9,3	9,3	60,7	99,2	-3,1	-89,5	-92,2
5/23	19,5	15,0	9,4	9,4	65,7	87,2	0,0	-62,5	35,4
6/24	18,5	18,1	9,5	9,5	70,6	72,5	0,0	-24,6	119,2
7/ 1	16,1	20,5	9,2	9,2	79,6	60,5	0,0	21,2	239,7
8/ 2	15,4	21,4	9,1	9,1	82,4	56,5	0,0	54,1	227,4
9/ 3	14,7	21,2	8,9	8,9	84,4	56,1	0,0	64,6	204,2
10/ 4	14,1	20,3	8,8	8,8	86,7	58,6	0,0	65,3	174,5
11/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,4	0,0	57,5	117,2
12/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,3	0,0	40,8	35,1

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_7\

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,8
1/19	24,7	10,2	8,8	7,8	44,8	100,0	-32,5	-173,5	-696,6
2/20	23,2	11,2	9,0	8,4	50,2	100,0	-28,3	-151,6	-456,2
3/21	21,9	12,2	9,2	9,0	55,5	100,0	-14,3	-117,9	-261,4
4/22	20,6	13,0	9,3	9,3	60,7	98,4	-2,4	-88,4	-96,1
5/23	19,5	15,2	9,4	9,4	65,7	86,5	0,0	-60,9	30,0
6/24	18,5	18,0	9,5	9,5	70,6	72,8	0,0	-24,2	113,4
7/ 1	16,1	20,2	9,2	9,2	79,7	61,4	0,0	19,5	235,7
8/ 2	15,4	21,2	9,1	9,1	82,4	57,3	0,0	51,6	225,8
9/ 3	14,7	21,0	8,9	8,9	84,4	56,6	0,0	62,6	204,7
10/ 4	14,1	20,2	8,8	8,8	86,7	58,8	0,0	64,1	176,0
11/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,6	0,0	56,9	119,2
12/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,3	0,0	40,6	37,3

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_8\

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,7

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
1/19	24,7	10,2	8,8	7,8	44,8	100,0	-32,7	-173,7	-696,3
2/20	23,2	11,1	9,0	8,3	50,2	100,0	-29,3	-152,8	-454,8
3/21	21,9	12,2	9,2	8,9	55,5	100,0	-15,5	-119,2	-258,6
4/22	20,6	12,9	9,3	9,3	60,7	99,2	-3,1	-89,5	-92,3
5/23	19,5	15,0	9,4	9,4	65,7	87,2	0,0	-62,5	35,3
6/24	18,5	18,1	9,5	9,5	70,6	72,5	0,0	-24,6	119,1
7/ 1	16,1	20,5	9,2	9,2	79,7	60,6	0,0	21,2	239,7
8/ 2	15,4	21,4	9,1	9,1	82,4	56,5	0,0	54,1	227,4
9/ 3	14,7	21,2	8,9	8,9	84,4	56,1	0,0	64,5	204,3
10/ 4	14,1	20,3	8,8	8,8	86,7	58,6	0,0	65,2	174,5
11/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,4	0,0	57,5	117,2
12/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,3	0,0	40,8	35,1

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_9\

Gegenüber Tabelle 9.1 änderten sich nach der programminternen Umstellung die Gittergrößen. Sie werden deshalb nachfolgend wiedergegeben.

- Gitterdarstellung der Partikel und Ermittlung des maximalen Zeitschrittes:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Unterteilung der halben Quadratseite: Dx(p) in cm									
Maximale Gitternummer: jmax(p) = kmax(p)									
0,88	0,82	0,90	0,58	0,65	0,66	0,74	0,53	0,54	0,00
2	2	2	6	6	4	4	10	12	0
Unterteilung der halben Quaderlänge: Dy(p) in cm									
Maximale Gitternummer: imax(p)									
0,36	0,67	0,53	0,80	0,92	0,58	0,53	0,67	0,57	0,00
2	6	8	2	2	10	12	4	6	0
Maximale Zeitschrittweite für die Partikelapproximation: DtauPartikel(p) in s									
4,97	9,80	8,49	6,74	8,52	6,71	7,08	5,47	5,12	0,00

Maximal wählbare Zeitschrittweite: 4 s
Vorgeschlagene Zeitschrittweite: 4 s (ganzzahlig in 3600 s enthalten)

- Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,6
1/19	24,7	10,2	8,8	7,8	44,8	100,0	-32,5	-173,5	-696,7
2/20	23,2	11,2	9,0	8,4	50,2	100,0	-28,5	-151,7	-456,2
3/21	21,9	12,2	9,2	9,0	55,5	100,0	-14,4	-118,0	-261,1
4/22	20,6	13,0	9,3	9,3	60,7	98,4	-2,4	-88,5	-95,6
5/23	19,5	15,2	9,4	9,4	65,7	86,5	0,0	-61,0	30,5
6/24	18,5	18,0	9,5	9,5	70,7	72,8	0,0	-24,2	113,9
7/ 1	16,1	20,3	9,2	9,2	79,7	61,4	0,0	19,6	236,2
8/ 2	15,4	21,2	9,1	9,1	82,4	57,3	0,0	51,8	226,0
9/ 3	14,7	21,1	8,9	8,9	84,4	56,6	0,0	62,8	204,7
10/ 4	14,1	20,2	8,8	8,8	86,7	58,8	0,0	64,2	175,9
11/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,6	0,0	57,0	119,0
12/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,3	0,0	40,6	37,0

Die Bilder 10.1 und 10.2 vergleichen den Einfluss der Gitterstruktur auf die Temperaturverläufe

längs des Speichers zur jeweils gleichen BS und Partikelgröße.

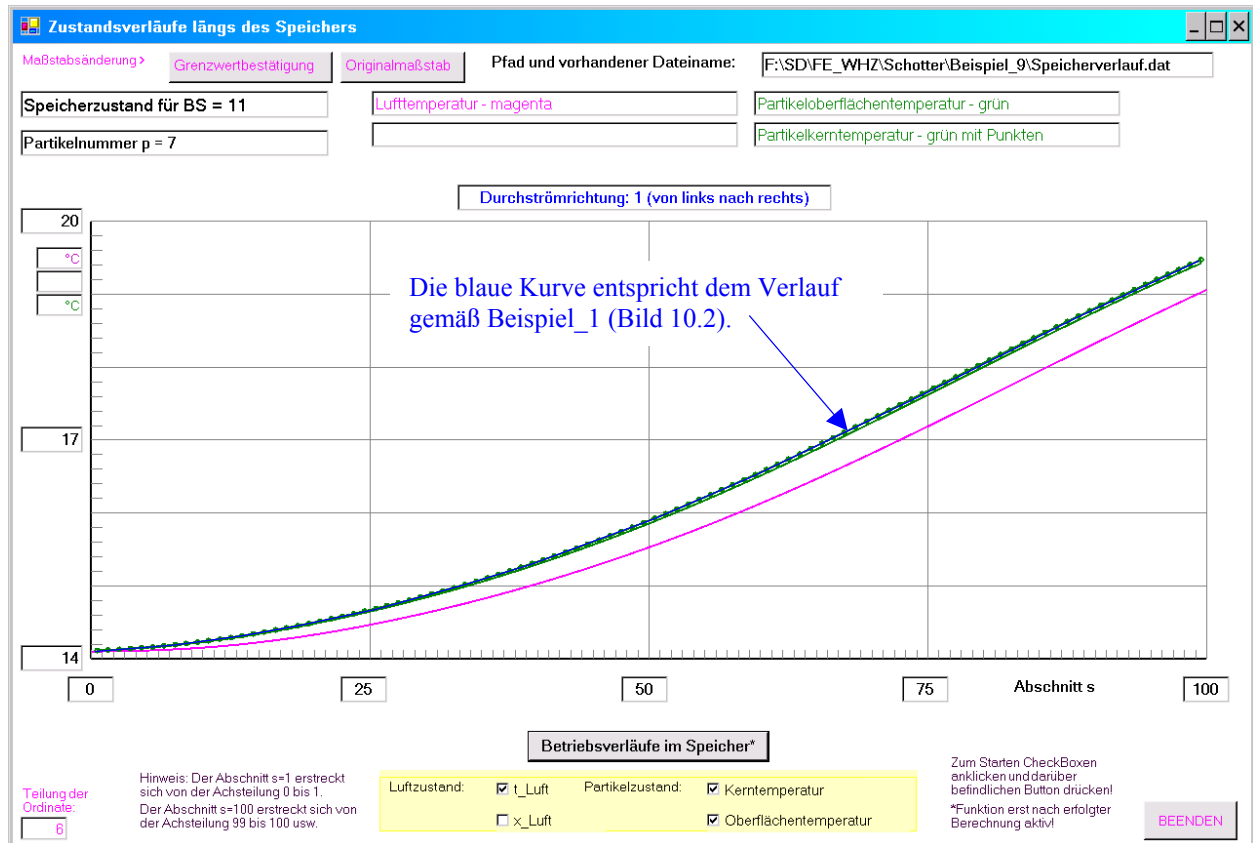


Bild 10.1 Temperaturverläufe längs des Speichers am Ende der 11. Betriebsstunde unter Verwendung des doppelt feinen Gitters (Beispiel_9)

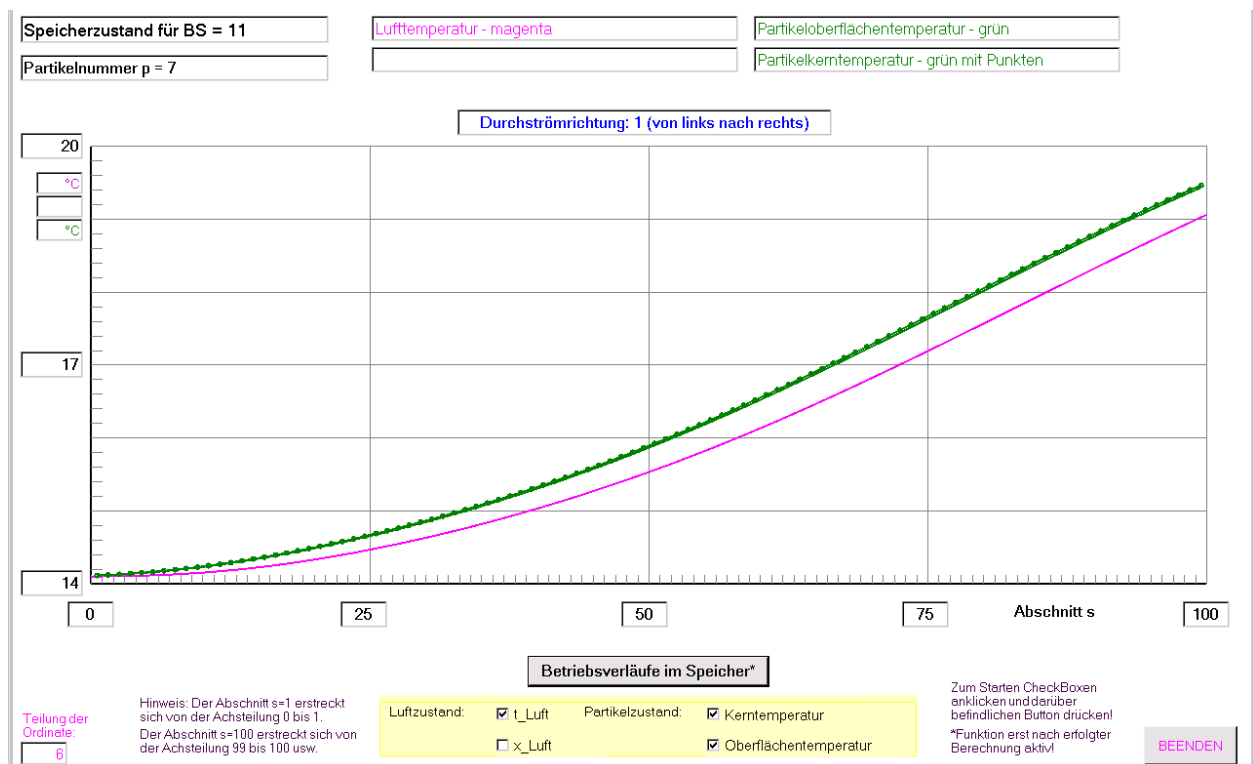


Bild 10.2 Temperaturverläufe längs des Speichers am Ende der 11. Betriebsstunde unter Verwendung des normalen Gitters (Beispiel_1)

Feststellungen:

Der Vergleich der Ergebnisse wird bezogen auf Beispiel 1 geführt. Die zusammengefasste Auswertung ist Tabelle 10.1 zu entnehmen.

Tabelle 10.1 Vergleich der Ergebnisse bei Variation der Diskretisierungsgrößen bezogen auf den Stand bei Beispiel 1 (Abschnitt 9.1)

	smax	Dtaus	Partikelgitter	maximale Abweichungen	
				Luftaustrittstemperatur K	Wärmestrom %
Beispiel 1	100	15	normal	0	0
Beispiel 6	50	15	normal	0,3	9
Beispiel 7	100	10	normal	0	<1
Beispiel 8	50	10	normal	0,3	9
Beispiel 9	100	4	doppelt fein	0,1	<1

- Die **Speicherunterteilung** nimmt großen Einfluss auf die Genauigkeit. Die Größe $s_{max} = 100$ erscheint bei der betrachteten Speicherlänge als geeignete Festlegung.
- Eine Verkürzung der **Zeitschrittweite** Δt führt zu keiner markanten Genauigkeitssteigerung. D. h., die automatisch vorgeschlagene Zeitschrittweite muss nicht unterschritten werden.
- Der im Rechenprogramm implementierte Algorithmus zur **Gitterfestlegung** ist von völlig ausreichender Qualität. Eine Halbierung der Gitterabstände brachte keine nennenswerte Ergebnisverbesserung. Besonders nachteilig erwies sich in diesem Fall die Rechenzeiterhöhung um das ca. 30-fache, da mit der Gitterverfeinerung automatisch auch eine Reduzierung der Zeitschrittweite gemäß Gl. (3.15) zwingend ist.
- Die verfeinerte Gitterstruktur ergibt praktisch identische Temperaturverteilungen längs des Speichers. Dennoch ist aus Bild 10.1 gegenüber Bild 10.2 die bessere Auflösung des Partikels $p = 9$ erkennbar, da die Spreizung der Kurven Partikeloberflächentemperatur und Partikelkerntemperatur größer geworden ist.

11 Unsicherheiten bei der Simulation

In den Vorbemerkungen (Abschnitt 1) wurden verschiedene Annahmen zur Grundlage für das Simulationsmodell erhoben.

- Ein zentraler Punkt war die Annahme **gleicher Luftgeschwindigkeit in allen Hohlräumen**. Auf deren Grundlage wird der Wärmeübergangskoeffizient α_L abschnittsweise – lediglich in Abhängigkeit des Luftzustandes – bestimmt. In einer Sensitivitätsbetrachtung werde in Beispiel

11 ein stets um 20 % niedrigerer Wert als beim Beispiel 1 angesetzt. Es folgen die Ergebnisse:

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_11\

Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,8
1/19	24,7	10,3	8,8	7,9	44,8	100,0	-31,7	-172,5	-697,6
2/20	23,2	11,3	9,0	8,4	50,1	100,0	-25,8	-148,5	-460,4
3/21	21,9	12,3	9,2	9,0	55,5	100,0	-12,3	-115,5	-267,9
4/22	20,6	13,2	9,3	9,3	60,7	97,1	-1,6	-87,0	-104,1
5/23	19,5	15,4	9,4	9,4	65,7	85,4	0,0	-58,6	19,7
6/24	18,5	17,9	9,5	9,5	70,6	73,4	0,0	-23,7	102,6
7/ 1	16,1	19,9	9,2	9,2	79,6	62,9	0,0	16,8	227,6
8/ 2	15,4	20,8	9,1	9,1	82,4	58,8	0,0	47,4	222,0
9/ 3	14,7	20,7	8,9	8,9	84,4	57,7	0,0	58,9	204,6
10/ 4	14,1	20,0	8,8	8,8	86,7	59,5	0,0	61,6	178,5
11/ 5	14,1	19,0	8,7	8,7	85,8	62,9	0,0	55,5	123,1
12/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,3	0,0	40,2	41,7

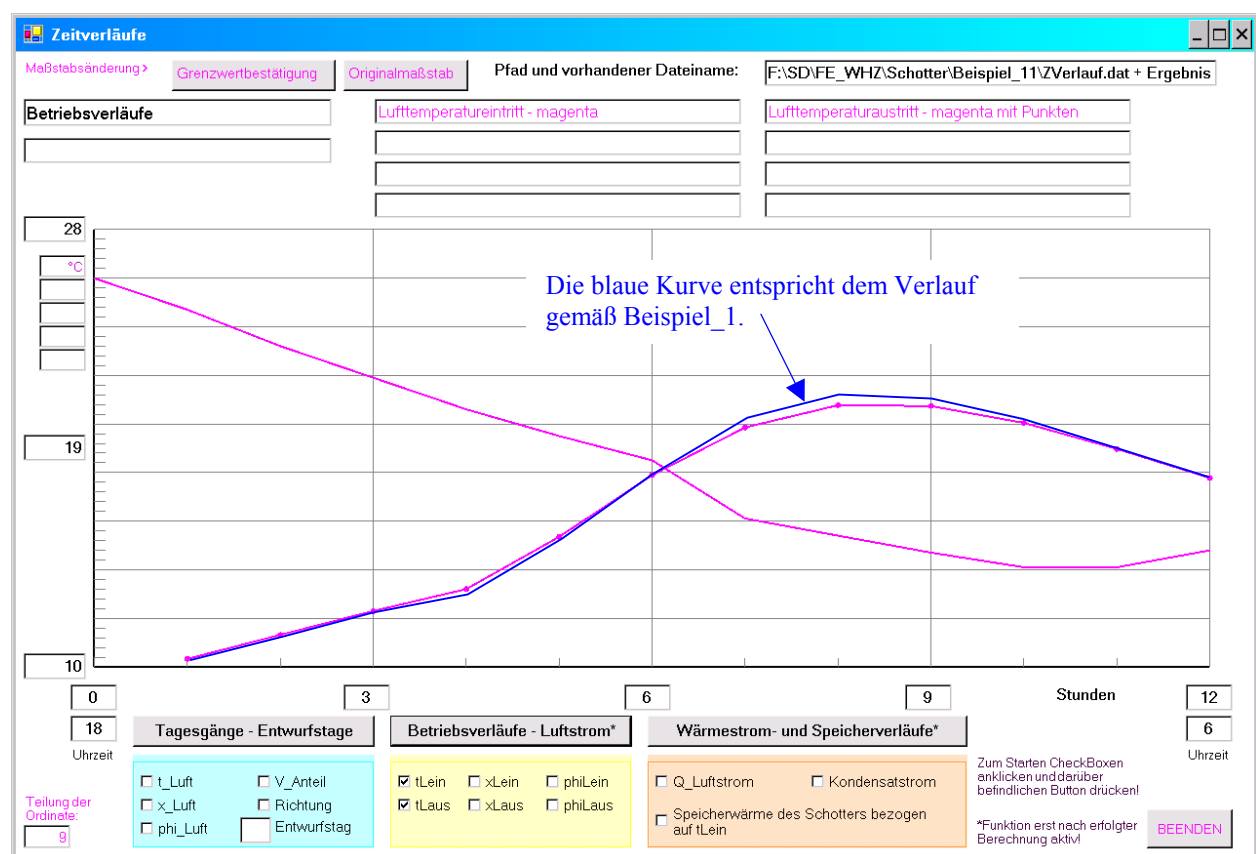


Bild 11.1 Lufteintritts- und -austrittstemperatur für Beispiel_11 mit 20 % kleinerem Wärmeübergangskoeffizienten gegenüber Beispiel_1

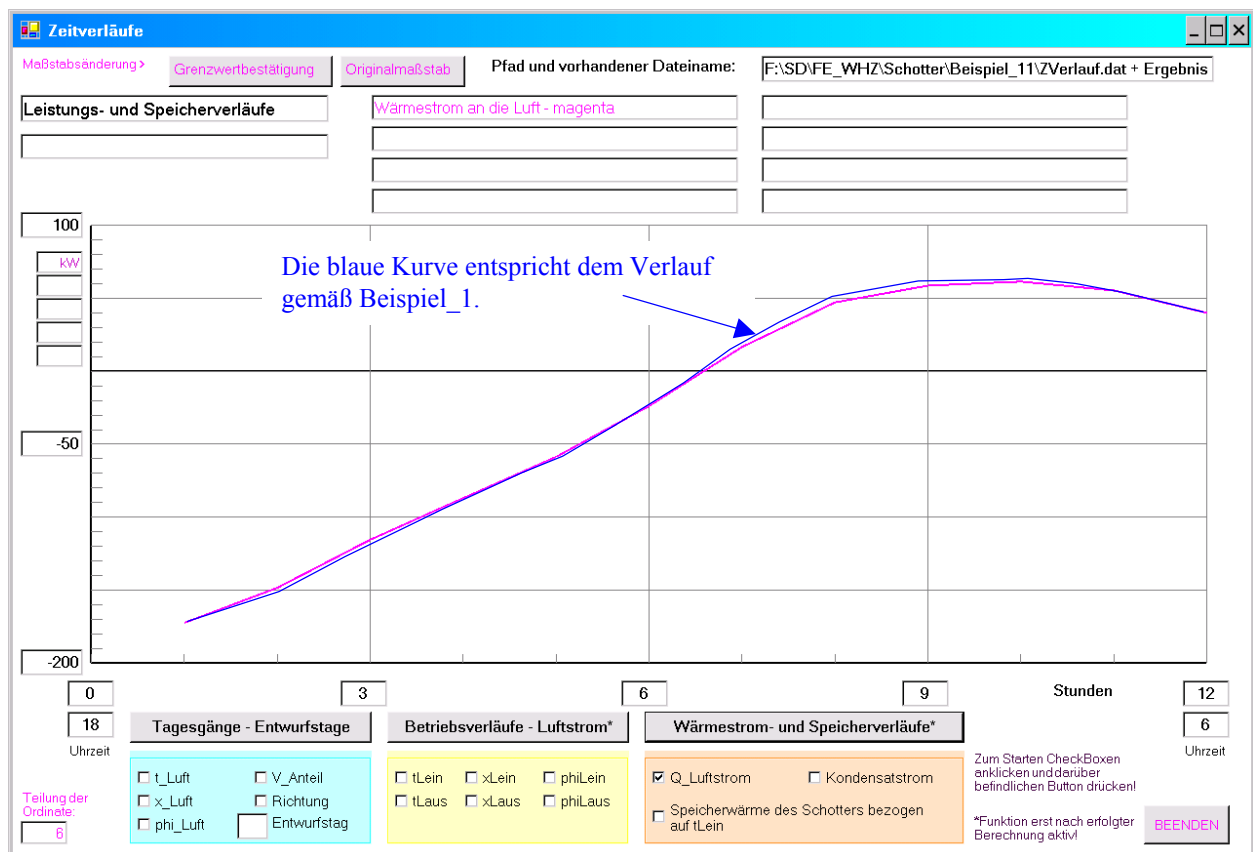


Bild 11.2 Leistung des Schotterspeichers für Beispiel_11 mit 20 % kleinerem Wärmeübergangskoeffizienten gegenüber Beispiel_1

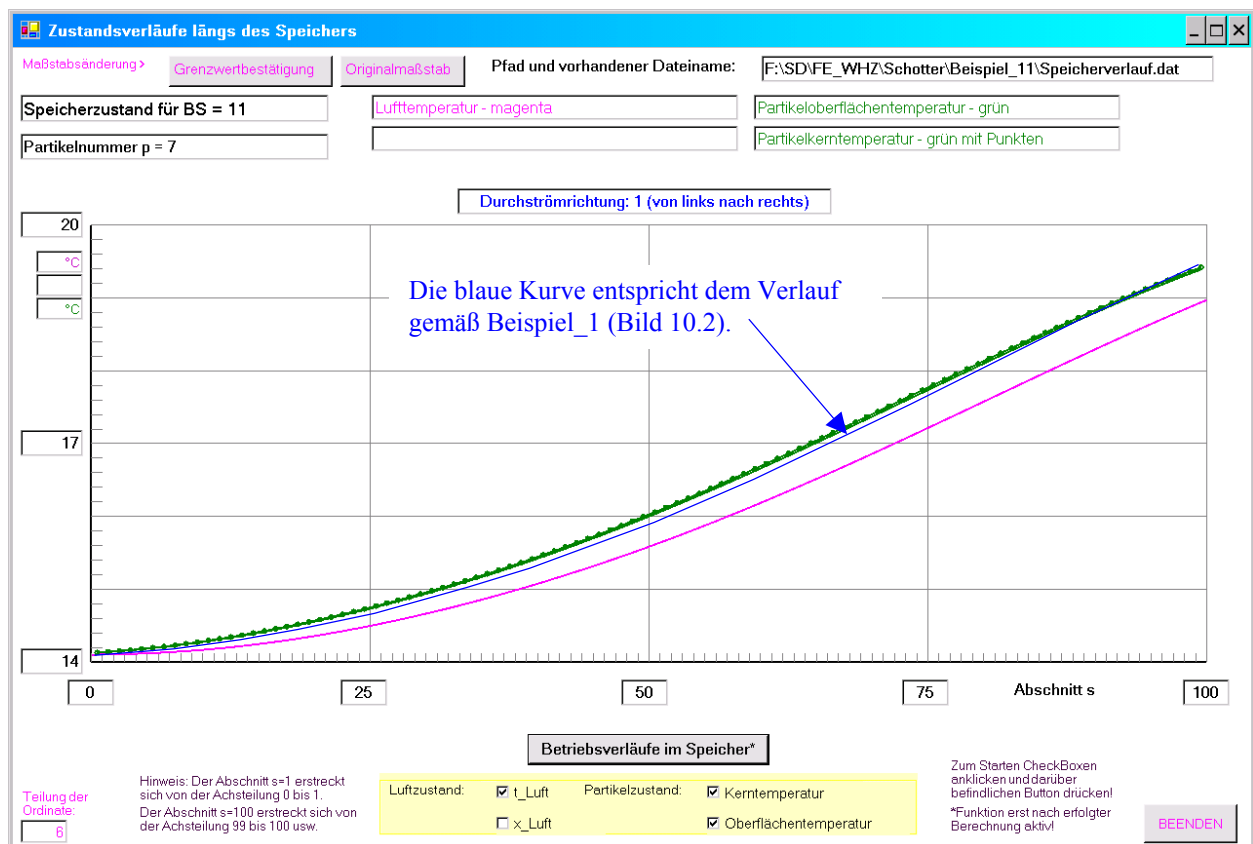


Bild 11.3 Luft- und Partikeltemperatur längs des Speichers für Beispiel_11 mit 20 % kleinerem Wärmeübergangskoeffizienten gegenüber Beispiel_1

Feststellungen:

- Aufgrund des kleineren Wärmeübergangskoeffizienten verringert sich logischerweise der Wärmeaustausch zwischen Schotter und Luftstrom, weshalb beim Beispiel 11 **kleinere Schwingungen** der Luftaustrittstemperatur und des Wärmestromes gegenüber Beispiel 1 auftreten.
- Die **Temperaturabweichung** bezüglich des Luftaustritts beträgt maximal 0,4 K, die **Leistungsabweichung** erreicht mit 14 % ihren Höchstwert.
- Falls sich im Ergebnis von Verifizierungen des Simulationsmodells an realen Leistungsmessungen Modifikationen erforderlich machen, so bietet die Änderung des Berechnungsansatzes für den Wärmeübergangskoeffizienten (Gln. (5.27) und (5.28)) eine wichtige Möglichkeit.

■ Eine weitere grundlegende Annahme für die Erstellung des Simulationsmodells war, dass **keine Wärmeleitung zwischen den Partikeln** angenommen wurde. D. h., der Speicher stellt kein Kontinuum dar. Eine Gegenüberstellung mit einem Modell, welches einen teilweise wärmeleitenden Kontakt zwischen den Partikeln beinhaltet, ist wegen fehlender Algorithmen nicht möglich.

■ Schließlich verbleibt noch die Ungenauigkeit, dass **keine Verknüpfung zwischen Durchströmgeschwindigkeit und Zeitschrittweite** existiert. Inwieweit das Fehlen dieser Verbindung Ungenauigkeiten verursacht, kann ebenfalls wegen fehlender Vergleichsmöglichkeiten nicht quantifiziert werden. Falls zeitliche Speichereffekte im Luftstrom wider Erwarten zu berücksichtigen wären, könnte man gedankliche Anleihen aus [8] sowohl für eine analytische Betrachtung (Seite 53) als auch für einen numerisch, diskretisierten Zusammenhang (Seite 84) der Temperatur-Weg-Zeit-Funktion entnehmen.

12 Hauptanwendungsgebiete für das Simulationsmodell

■ Das erste Hauptanwendungsgebiet wird in **Trenduntersuchungen** gesehen. So können sehr gut Parametervariationen beispielsweise bezüglich

- der **Durchströmlänge**,
 - der **Partikelzusammensetzung**
 - und mit **geringerem Einfluss der wärmetechnischen Gesteinsparameter**
- durchgeführt werden.

Als durchaus interessant könnten auch **künstlich hergestellte Schüttmaterialien** sein, deren wärmetechnische Eigenschaften in Grenzen gestaltbar wären.

Die genannten Betrachtungen sollten möglichst für verschiedene Entwurfstage, die den Jahresgang des Außenluftzustandes repräsentieren, durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind dann den Bedarfsanforderungen gegenüberzustellen, um z. B. einen "Erfüllungsgrad" ermitteln zu können.

■ Das zweite Hauptanwendungsgebiet sind **Untersuchungen zur Betriebsoptimierung**. Relevant sind beispielsweise in Abhängigkeit der Entwurfstage

- die Festlegung der Betriebszeiten,
- die Fixierung eventueller Stillstandszeiten
- sowie die Optimierung der Speicherregeneration (Zeiten, Durchflussrichtung, Volumenstrom).

Generell hat der **Volumenstrom dominierenden Einfluss auf die Betriebscharakteristik** des Speichers. Er kann somit zum entscheidenden Steuerungsinstrument werden.

Dies sei an Beispiel 1 (Luftvolumenstrom 30000 m³/h) und zwei weiteren Volumenstromvariationen (Beispiel 10a: 15000 m³/h; Beispiel 10b: 3000 m³/h) demonstriert (Bilder 12.2 bis 12.4). Bei den ersten beiden Varianten werden 72 Betriebsstunden nach dem Start mit der homogenen Speichertemperatur von 10 °C betrachtet. Da bei der dritten Variante (Luftvolumenstrom 3000 m³/h) sich nur ein sehr langsames "Hocharbeiten des Speichers" gemäß Bild 12.1 ergab, sind 144 Stunden simuliert worden, wobei die letzten 72 Stunden für die Gegenüberstellung verwendet werden.

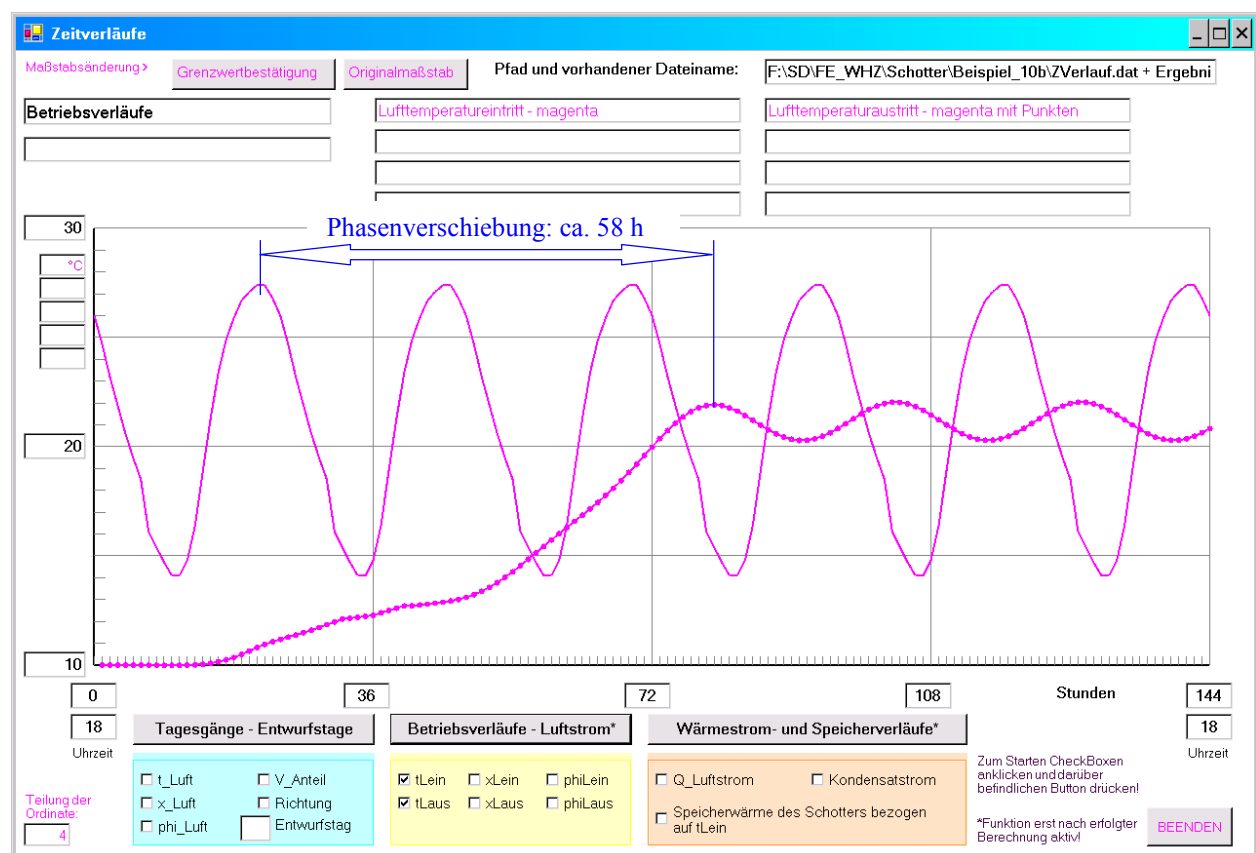


Bild 12.1 Tagesschwingungen der Lufteintrittstemperatur und das "langsame Einschwingen" der Luftaustrittstemperatur beim Beispiel_10b (Luftvolumenstrom 3000 m³/h)

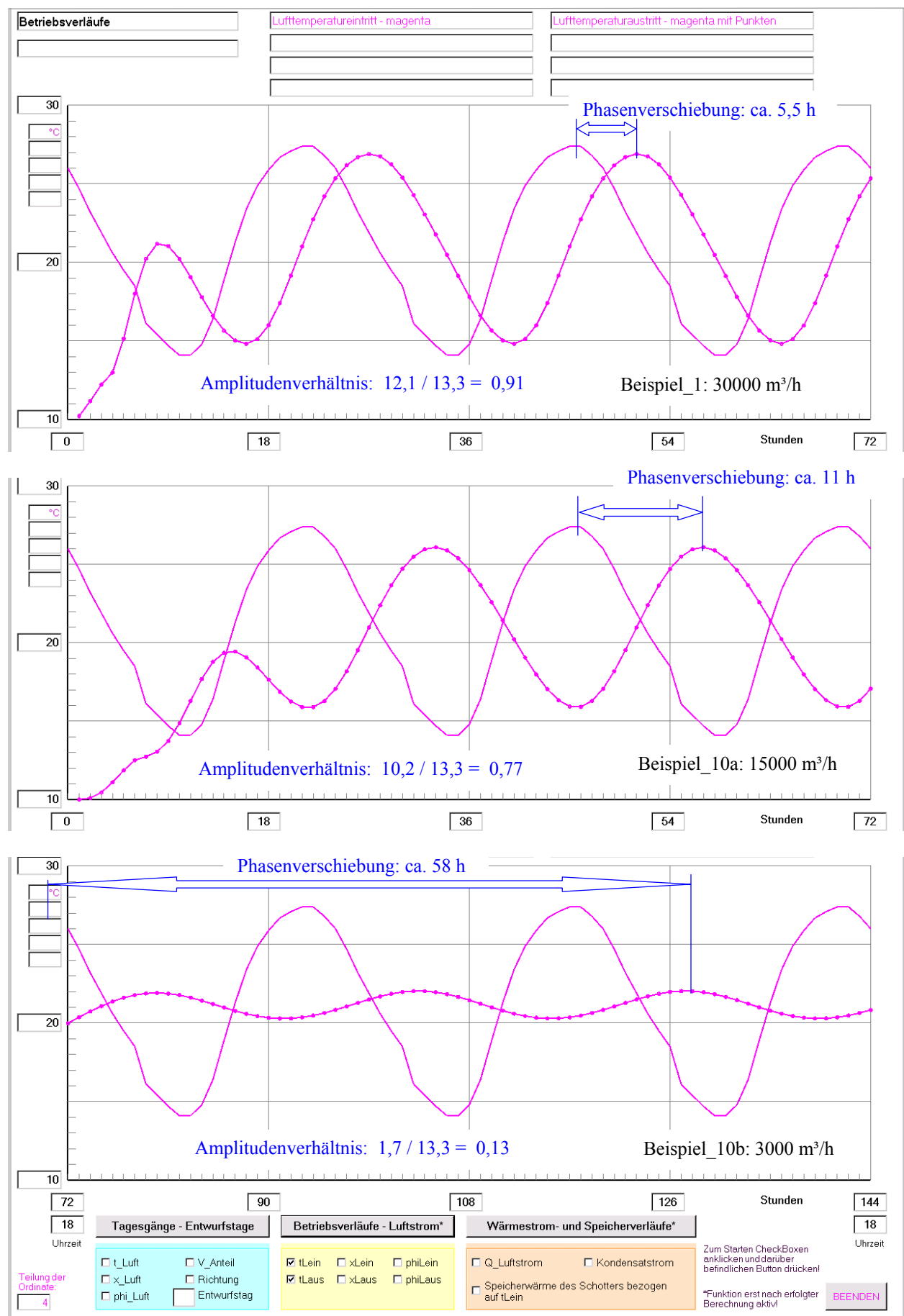


Bild 12.2 Gegenüberstellung der Luftaustrittstemperaturen bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen

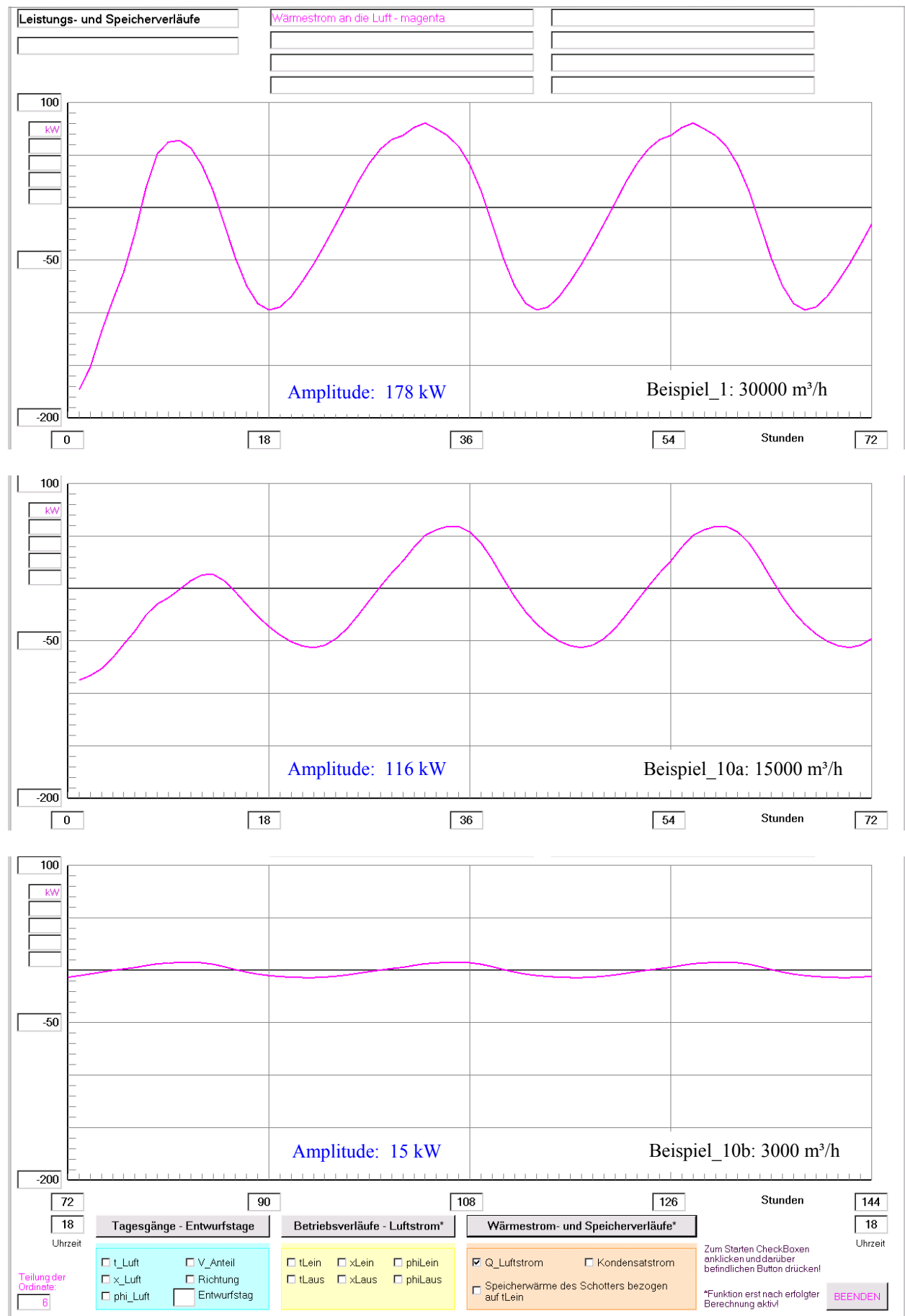


Bild 12.3 Gegenüberstellung der Leistungen bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen

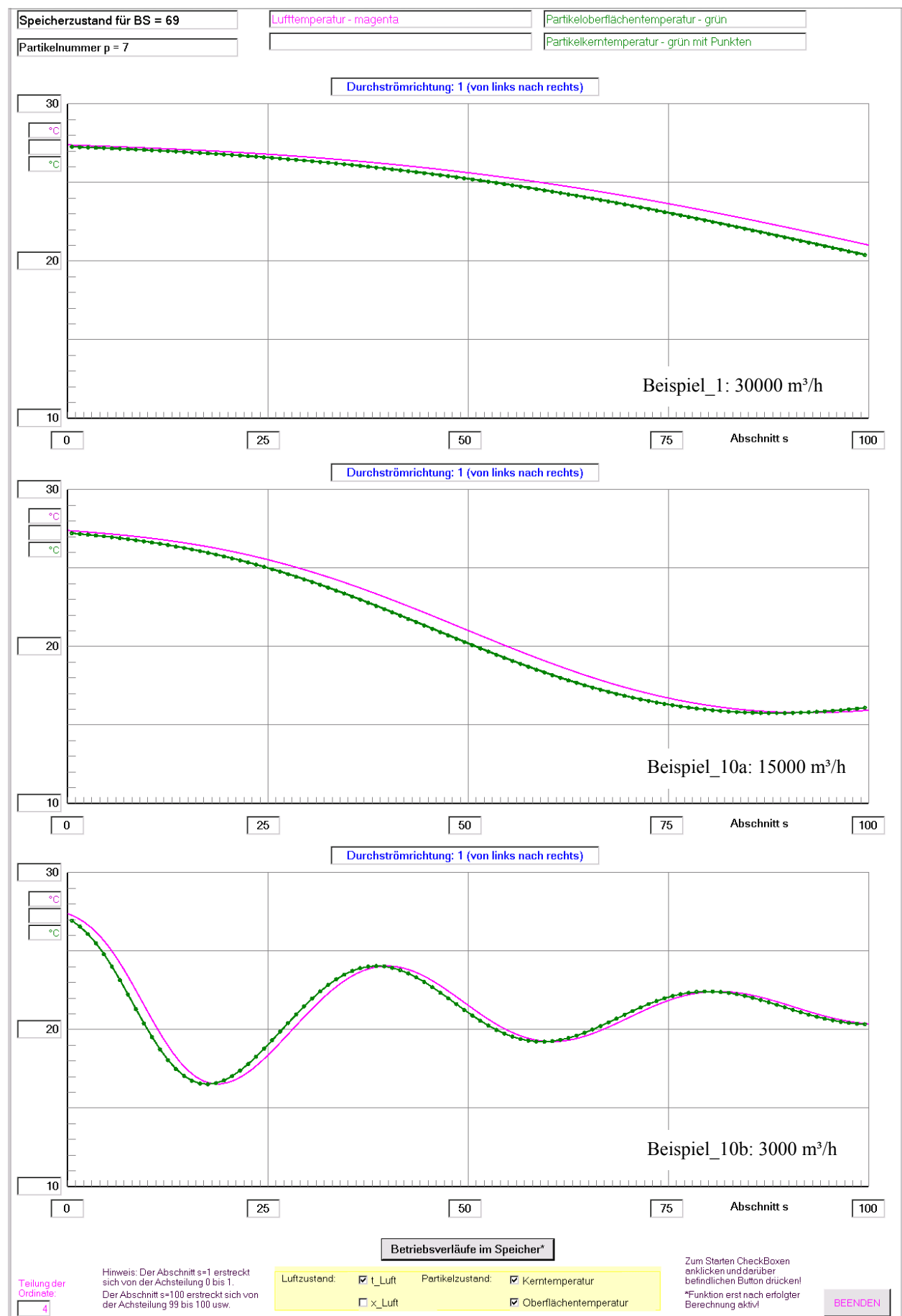


Bild 12.4 Gegenüberstellung der Temperaturen längs des Speichers bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen zur Betriebsstunde 69 für die oberen Varianten und zur Betriebsstunde 141 für die untere Variante

Die Einzelwerte für Beispiel 1 sind der Tabelle 9.3 (Seite 71) zu entnehmen, Ergebnistabellen für die Beispiele 10a und 10b schließen sich nachfolgend an.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_10A\

Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,8
1/19	24,7	10,0	8,8	7,7	44,8	100,0	-16,8	-87,3	-782,9
2/20	23,2	10,1	9,0	7,8	50,1	100,0	-20,0	-82,9	-611,2
3/21	21,9	10,5	9,2	8,0	55,5	100,0	-21,6	-76,4	-457,8
4/22	20,6	11,1	9,3	8,3	60,7	100,0	-19,5	-66,1	-314,7
5/23	19,5	11,9	9,4	8,8	65,7	100,0	-14,1	-53,0	-196,6
6/24	18,5	12,5	9,5	9,1	70,6	100,0	-8,6	-40,4	-97,0
7/ 1	16,1	12,7	9,2	9,2	79,6	99,1	-2,0	-25,0	69,6
8/ 2	15,4	13,1	9,1	9,1	82,4	96,0	0,0	-14,6	126,1
9/ 3	14,7	13,7	8,9	8,9	84,4	89,8	0,0	-8,6	176,1
10/ 4	14,1	14,9	8,8	8,8	86,7	82,5	0,0	-0,7	212,3
11/ 5	14,1	16,3	8,7	8,7	85,8	74,5	0,0	7,5	204,9
12/ 6	14,8	17,7	8,9	8,9	83,8	69,7	0,0	13,1	150,6
13/ 7	16,4	18,8	9,2	9,2	78,2	67,2	0,0	13,7	42,4
14/ 8	18,9	19,4	9,4	9,4	68,2	66,2	0,0	7,5	-112,8
15/ 9	21,3	19,4	9,5	9,5	59,4	66,6	0,0	-3,2	-251,6
16/10	23,4	19,1	9,4	9,4	51,8	67,4	0,0	-15,2	-360,7
17/11	24,9	18,4	9,0	9,0	45,3	67,3	0,0	-26,6	-423,1
18/12	25,9	17,6	8,7	8,7	41,3	68,4	0,0	-36,2	-446,2
19/13	26,7	16,9	8,6	8,6	38,9	71,0	0,0	-44,4	-449,2
20/14	27,1	16,3	8,5	8,5	37,6	72,9	0,0	-50,7	-422,3
21/15	27,4	15,9	8,5	8,5	36,9	74,6	0,0	-54,7	-385,3
22/16	27,4	15,9	8,4	8,4	36,5	73,8	0,0	-56,4	-329,0
23/17	26,8	16,3	8,5	8,5	38,3	72,8	0,0	-54,0	-239,7
24/18	26,0	17,1	8,6	8,6	40,6	70,1	0,0	-47,8	-144,6
25/19	24,7	18,2	8,8	8,8	44,8	66,8	0,0	-38,1	-29,6
26/20	23,2	19,5	9,0	9,0	50,1	62,8	0,0	-25,2	84,3
27/21	21,9	21,0	9,2	9,2	55,5	58,7	0,0	-11,4	172,7
28/22	20,6	22,4	9,3	9,3	60,7	54,4	0,0	2,2	247,3
29/23	19,5	23,7	9,4	9,4	65,7	50,9	0,0	15,0	297,4
30/24	18,5	24,7	9,5	9,5	70,6	48,3	0,0	26,3	330,4
31/ 1	16,1	25,5	9,2	9,2	79,6	44,7	0,0	39,7	432,4
32/ 2	15,4	26,0	9,1	9,1	82,4	43,0	0,0	50,9	423,3
33/ 3	14,7	26,1	8,9	8,9	84,4	41,7	0,0	56,2	408,6
34/ 4	14,1	25,9	8,8	8,8	86,7	41,7	0,0	59,4	384,7
35/ 5	14,1	25,4	8,7	8,7	85,8	42,5	0,0	59,2	325,6
36/ 6	14,8	24,6	8,9	8,9	83,8	45,5	0,0	54,1	230,2
37/ 7	16,4	23,7	9,2	9,2	78,2	49,8	0,0	43,7	92,1
38/ 8	18,9	22,6	9,4	9,4	68,2	54,3	0,0	27,8	-83,4
39/ 9	21,3	21,4	9,5	9,5	59,4	58,9	0,0	9,6	-235,1
40/10	23,4	20,2	9,4	9,4	51,8	62,8	0,0	-7,5	-351,9
41/11	24,9	19,1	9,0	9,0	45,3	64,7	0,0	-22,3	-418,6
42/12	25,9	18,0	8,7	8,7	41,3	67,0	0,0	-33,9	-444,0
43/13	26,7	17,0	8,6	8,6	38,9	70,2	0,0	-43,2	-448,1
44/14	27,1	16,3	8,5	8,5	37,6	72,6	0,0	-50,1	-421,8
45/15	27,4	15,9	8,5	8,5	36,9	74,4	0,0	-54,5	-385,1
46/16	27,4	15,9	8,4	8,4	36,5	73,7	0,0	-56,2	-328,9
47/17	26,8	16,3	8,5	8,5	38,3	72,8	0,0	-54,0	-239,6
48/18	26,0	17,1	8,6	8,6	40,6	70,1	0,0	-47,8	-144,5
49/19	24,7	18,2	8,8	8,8	44,8	66,8	0,0	-38,1	-29,6
50/20	23,2	19,5	9,0	9,0	50,1	62,8	0,0	-25,2	84,3
51/21	21,9	21,0	9,2	9,2	55,5	58,7	0,0	-11,4	172,7
52/22	20,6	22,4	9,3	9,3	60,7	54,4	0,0	2,2	247,3
53/23	19,5	23,7	9,4	9,4	65,7	50,9	0,0	15,0	297,4
54/24	18,5	24,7	9,5	9,5	70,6	48,3	0,0	26,3	330,4
55/ 1	16,1	25,5	9,2	9,2	79,6	44,7	0,0	39,7	432,4
56/ 2	15,4	26,0	9,1	9,1	82,4	43,0	0,0	50,9	423,3

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
57/ 3	14,7	26,1	8,9	8,9	84,4	41,7	0,0	56,2	408,6
58/ 4	14,1	25,9	8,8	8,8	86,7	41,7	0,0	59,4	384,7
59/ 5	14,1	25,4	8,7	8,7	85,8	42,5	0,0	59,2	325,6
60/ 6	14,8	24,6	8,9	8,9	83,8	45,5	0,0	54,1	230,2
61/ 7	16,4	23,7	9,2	9,2	78,2	49,8	0,0	43,7	92,1
62/ 8	18,9	22,6	9,4	9,4	68,2	54,3	0,0	27,8	-83,4
63/ 9	21,3	21,4	9,5	9,5	59,4	58,9	0,0	9,6	-235,1
64/10	23,4	20,2	9,4	9,4	51,8	62,8	0,0	-7,5	-351,9
65/11	24,9	19,1	9,0	9,0	45,3	64,7	0,0	-22,3	-418,6
66/12	25,9	18,0	8,7	8,7	41,3	67,0	0,0	-33,9	-444,0
67/13	26,7	17,0	8,6	8,6	38,9	70,2	0,0	-43,2	-448,1
68/14	27,1	16,3	8,5	8,5	37,6	72,6	0,0	-50,1	-421,8
69/15	27,4	15,9	8,5	8,5	36,9	74,4	0,0	-54,5	-385,1
70/16	27,4	15,9	8,4	8,4	36,5	73,7	0,0	-56,2	-328,9
71/17	26,8	16,3	8,5	8,5	38,3	72,8	0,0	-54,0	-239,6
72/18	26,0	17,1	8,6	8,6	40,6	70,1	0,0	-47,8	-144,5

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_WHZ\SCHOTTER\BEISPIEL_10B\

Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	-	8,6	-	40,6	-	-	-	-946,8
1/19	24,7	10,0	8,8	7,7	44,8	100,0	-3,4	-17,5	-852,8
2/20	23,2	10,0	9,0	7,7	50,1	100,0	-4,1	-16,6	-747,3
3/21	21,9	10,0	9,2	7,7	55,5	100,0	-4,8	-15,8	-654,6
4/22	20,6	10,0	9,3	7,7	60,7	100,0	-5,3	-15,0	-562,7
5/23	19,5	10,0	9,4	7,7	65,7	100,0	-5,7	-14,1	-483,4
6/24	18,5	10,0	9,5	7,7	70,6	100,0	-6,1	-13,3	-410,9
7/ 1	16,1	10,0	9,2	7,7	79,6	100,0	-5,8	-11,4	-257,9
8/ 2	15,4	10,0	9,1	7,7	82,4	100,0	-5,1	-9,4	-206,6
9/ 3	14,7	10,0	8,9	7,7	84,4	100,0	-4,5	-8,3	-156,9
10/ 4	14,1	10,0	8,8	7,7	86,7	100,0	-4,0	-7,3	-114,0
11/ 5	14,1	10,0	8,7	7,7	85,8	100,0	-3,7	-6,8	-107,1
12/ 6	14,8	10,0	8,9	7,7	83,8	100,0	-3,8	-7,2	-141,1
13/ 7	16,4	10,0	9,2	7,7	78,2	100,0	-4,7	-9,0	-226,6
14/ 8	18,9	10,0	9,4	7,8	68,2	100,0	-5,5	-11,6	-362,7
15/ 9	21,3	10,1	9,5	7,8	59,4	100,0	-5,9	-14,2	-490,6
16/10	23,4	10,1	9,4	7,8	51,8	100,0	-5,8	-16,2	-598,7
17/11	24,9	10,2	9,0	7,9	45,3	100,0	-4,8	-17,1	-670,4
18/12	25,9	10,4	8,7	7,9	41,3	100,0	-3,3	-17,2	-712,5
19/13	26,7	10,5	8,6	8,0	38,9	100,0	-2,4	-17,3	-742,6
20/14	27,1	10,6	8,5	8,1	37,6	100,0	-1,8	-17,3	-749,1
21/15	27,4	10,8	8,5	8,2	36,9	100,0	-1,3	-17,1	-749,7
22/16	27,4	10,9	8,4	8,2	36,5	100,0	-0,8	-16,8	-733,0
23/17	26,8	11,1	8,5	8,3	38,3	100,0	-0,6	-16,2	-681,5
24/18	26,0	11,2	8,6	8,4	40,6	100,0	-0,7	-15,5	-618,7
25/19	24,7	11,3	8,8	8,4	44,8	100,0	-1,0	-14,7	-527,3
26/20	23,2	11,4	9,0	8,5	50,1	100,0	-1,5	-13,6	-425,0
27/21	21,9	11,5	9,2	8,5	55,5	100,0	-2,0	-12,5	-335,5
28/22	20,6	11,6	9,3	8,6	60,7	100,0	-2,4	-11,4	-247,2
29/23	19,5	11,7	9,4	8,7	65,7	100,0	-2,5	-10,2	-171,8
30/24	18,5	11,9	9,5	8,8	70,6	100,0	-2,6	-9,1	-103,5
31/ 1	16,1	12,0	9,2	8,8	79,6	100,0	-2,0	-6,9	45,0
32/ 2	15,4	12,1	9,1	8,9	82,4	100,0	-1,0	-4,5	91,3
33/ 3	14,7	12,1	8,9	8,9	84,4	99,7	-0,3	-3,2	135,9
34/ 4	14,1	12,2	8,8	8,8	86,7	98,3	0,0	-2,3	173,7
35/ 5	14,1	12,2	8,7	8,7	85,8	96,9	0,0	-1,9	175,8
36/ 6	14,8	12,3	8,9	8,9	83,8	98,8	0,0	-2,2	136,8
37/ 7	16,4	12,4	9,2	9,1	78,2	100,0	-0,1	-3,4	45,7

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
38/ 8	18,9	12,5	9,4	9,1	68,2	100,0	-0,7	-5,8	-96,2
39/ 9	21,3	12,6	9,5	9,2	59,4	100,0	-1,0	-8,3	-230,0
40/10	23,4	12,7	9,4	9,3	51,8	100,0	-0,7	-10,2	-344,1
41/11	24,9	12,7	9,0	9,0	45,3	97,1	-0,1	-11,4	-421,7
42/12	25,9	12,8	8,7	8,7	41,3	93,6	0,0	-12,5	-468,5
43/13	26,7	12,8	8,6	8,6	38,9	92,3	0,0	-13,3	-502,6
44/14	27,1	12,8	8,5	8,5	37,6	91,0	0,0	-13,8	-512,6
45/15	27,4	12,9	8,5	8,5	36,9	90,8	0,0	-14,1	-516,3
46/16	27,4	12,9	8,4	8,4	36,5	89,4	0,0	-14,2	-502,2
47/17	26,8	13,0	8,5	8,5	38,3	90,0	0,0	-13,8	-453,0
48/18	26,0	13,1	8,6	8,6	40,6	90,5	0,0	-13,1	-392,6
49/19	24,7	13,2	8,8	8,8	44,8	91,8	0,0	-12,0	-303,8
50/20	23,2	13,4	9,0	9,0	50,1	92,9	0,0	-10,5	-204,6
51/21	21,9	13,6	9,2	9,2	55,5	93,8	0,0	-9,0	-118,6
52/22	20,6	13,8	9,3	9,3	60,7	93,6	0,0	-7,6	-34,1
53/23	19,5	14,0	9,4	9,4	65,7	93,1	0,0	-6,2	37,2
54/24	18,5	14,3	9,5	9,5	70,6	92,5	0,0	-4,9	101,3
55/ 1	16,1	14,6	9,2	9,2	79,6	88,0	0,0	-2,9	245,9
56/ 2	15,4	14,8	9,1	9,1	82,4	85,4	0,0	-1,1	288,8
57/ 3	14,7	15,1	8,9	8,9	84,4	82,0	0,0	-0,1	330,3
58/ 4	14,1	15,4	8,8	8,8	86,7	79,6	0,0	0,9	364,9
59/ 5	14,1	15,7	8,7	8,7	85,8	77,2	0,0	1,5	363,5
60/ 6	14,8	16,0	8,9	8,9	83,8	77,5	0,0	1,5	320,8
61/ 7	16,4	16,3	9,2	9,2	78,2	78,6	0,0	0,6	225,8
62/ 8	18,9	16,6	9,4	9,4	68,2	78,9	0,0	-1,2	79,3
63/ 9	21,3	16,9	9,5	9,5	59,4	78,3	0,0	-3,4	-59,4
64/10	23,4	17,2	9,4	9,4	51,8	76,1	0,0	-5,3	-178,4
65/11	24,9	17,5	9,0	9,0	45,3	71,6	0,0	-6,8	-260,5
66/12	25,9	17,8	8,7	8,7	41,3	67,8	0,0	-7,7	-312,2
67/13	26,7	18,1	8,6	8,6	38,9	65,7	0,0	-8,2	-351,4
68/14	27,1	18,5	8,5	8,5	37,6	63,5	0,0	-8,4	-366,7
69/15	27,4	18,8	8,5	8,5	36,9	62,1	0,0	-8,4	-376,0
70/16	27,4	19,2	8,4	8,4	36,5	59,9	0,0	-8,2	-367,9
71/17	26,8	19,6	8,5	8,5	38,3	59,1	0,0	-7,5	-325,0
72/18	26,0	20,0	8,6	8,6	40,6	58,4	0,0	-6,5	-271,2
73/19	24,7	20,4	8,8	8,8	44,8	58,3	0,0	-5,1	-189,3
74/20	23,2	20,7	9,0	9,0	50,1	58,3	0,0	-3,4	-97,3
75/21	21,9	21,1	9,2	9,2	55,5	58,3	0,0	-1,6	-18,7
76/22	20,6	21,4	9,3	9,3	60,7	57,9	0,0	-0,0	58,3
77/23	19,5	21,6	9,4	9,4	65,7	57,7	0,0	1,5	122,0
78/24	18,5	21,8	9,5	9,5	70,6	57,7	0,0	2,7	178,4
79/ 1	16,1	21,9	9,2	9,2	79,6	55,5	0,0	4,6	315,5
80/ 2	15,4	21,9	9,1	9,1	82,4	54,8	0,0	6,3	351,1
81/ 3	14,7	21,9	8,9	8,9	84,4	53,8	0,0	7,0	385,5
82/ 4	14,1	21,8	8,8	8,8	86,7	53,5	0,0	7,6	413,4
83/ 5	14,1	21,6	8,7	8,7	85,8	53,4	0,0	7,8	405,8
84/ 6	14,8	21,4	8,9	8,9	83,8	55,3	0,0	7,2	357,3
85/ 7	16,4	21,2	9,2	9,2	78,2	57,9	0,0	5,8	257,0
86/ 8	18,9	21,0	9,4	9,4	68,2	59,9	0,0	3,5	105,8
87/ 9	21,3	20,8	9,5	9,5	59,4	61,3	0,0	0,8	-37,0
88/10	23,4	20,6	9,4	9,4	51,8	61,4	0,0	-1,7	-159,7
89/11	24,9	20,4	9,0	9,0	45,3	59,4	0,0	-3,6	-245,0
90/12	25,9	20,3	8,7	8,7	41,3	57,8	0,0	-4,9	-299,4
91/13	26,7	20,3	8,6	8,6	38,9	57,3	0,0	-5,9	-340,9
92/14	27,1	20,3	8,5	8,5	37,6	56,6	0,0	-6,5	-358,2
93/15	27,4	20,4	8,5	8,5	36,9	56,4	0,0	-6,8	-369,2
94/16	27,4	20,5	8,4	8,4	36,5	55,3	0,0	-6,8	-362,5
95/17	26,8	20,6	8,5	8,5	38,3	55,4	0,0	-6,4	-320,7
96/18	26,0	20,8	8,6	8,6	40,6	55,4	0,0	-5,6	-267,9
97/19	24,7	21,1	8,8	8,8	44,8	55,9	0,0	-4,3	-186,7
98/20	23,2	21,3	9,0	9,0	50,1	56,4	0,0	-2,7	-95,3
99/21	21,9	21,5	9,2	9,2	55,5	56,8	0,0	-1,1	-17,1
100/22	20,6	21,7	9,3	9,3	60,7	56,7	0,0	0,4	59,4
101/23	19,5	21,9	9,4	9,4	65,7	56,8	0,0	1,7	122,8

BS/Tages- stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
102/24	18,5	22,0	9,5	9,5	70,6	57,0	0,0	2,9	179,1
103/ 1	16,1	22,0	9,2	9,2	79,6	55,0	0,0	4,8	316,0
104/ 2	15,4	22,0	9,1	9,1	82,4	54,4	0,0	6,4	351,4
105/ 3	14,7	22,0	8,9	8,9	84,4	53,5	0,0	7,1	385,7
106/ 4	14,1	21,8	8,8	8,8	86,7	53,3	0,0	7,7	413,6
107/ 5	14,1	21,7	8,7	8,7	85,8	53,3	0,0	7,8	405,9
108/ 6	14,8	21,5	8,9	8,9	83,8	55,1	0,0	7,3	357,4
109/ 7	16,4	21,2	9,2	9,2	78,2	57,8	0,0	5,9	257,1
110/ 8	18,9	21,0	9,4	9,4	68,2	59,9	0,0	3,5	105,9
111/ 9	21,3	20,8	9,5	9,5	59,4	61,3	0,0	0,8	-37,0
112/10	23,4	20,6	9,4	9,4	51,8	61,4	0,0	-1,6	-159,7
113/11	24,9	20,4	9,0	9,0	45,3	59,4	0,0	-3,6	-245,0
114/12	25,9	20,3	8,7	8,7	41,3	57,8	0,0	-4,9	-299,4
115/13	26,7	20,3	8,6	8,6	38,9	57,3	0,0	-5,9	-340,9
116/14	27,1	20,3	8,5	8,5	37,6	56,6	0,0	-6,5	-358,2
117/15	27,4	20,4	8,5	8,5	36,9	56,4	0,0	-6,8	-369,2
118/16	27,4	20,5	8,4	8,4	36,5	55,3	0,0	-6,8	-362,5
119/17	26,8	20,6	8,5	8,5	38,3	55,4	0,0	-6,4	-320,7
120/18	26,0	20,8	8,6	8,6	40,6	55,4	0,0	-5,6	-267,9
121/19	24,7	21,1	8,8	8,8	44,8	55,9	0,0	-4,3	-186,7
122/20	23,2	21,3	9,0	9,0	50,1	56,4	0,0	-2,7	-95,3
123/21	21,9	21,5	9,2	9,2	55,5	56,8	0,0	-1,1	-17,1
124/22	20,6	21,7	9,3	9,3	60,7	56,7	0,0	0,4	59,4
125/23	19,5	21,9	9,4	9,4	65,7	56,8	0,0	1,7	122,8
126/24	18,5	22,0	9,5	9,5	70,6	57,0	0,0	2,9	179,1
127/ 1	16,1	22,0	9,2	9,2	79,6	55,0	0,0	4,8	316,0
128/ 2	15,4	22,0	9,1	9,1	82,4	54,4	0,0	6,4	351,4
129/ 3	14,7	22,0	8,9	8,9	84,4	53,5	0,0	7,1	385,7
130/ 4	14,1	21,8	8,8	8,8	86,7	53,3	0,0	7,7	413,6
131/ 5	14,1	21,7	8,7	8,7	85,8	53,3	0,0	7,8	405,9
132/ 6	14,8	21,5	8,9	8,9	83,8	55,1	0,0	7,3	357,4
133/ 7	16,4	21,2	9,2	9,2	78,2	57,8	0,0	5,9	257,1
134/ 8	18,9	21,0	9,4	9,4	68,2	59,9	0,0	3,5	105,9
135/ 9	21,3	20,8	9,5	9,5	59,4	61,3	0,0	0,8	-37,0
136/10	23,4	20,6	9,4	9,4	51,8	61,4	0,0	-1,6	-159,7
137/11	24,9	20,4	9,0	9,0	45,3	59,4	0,0	-3,6	-245,0
138/12	25,9	20,3	8,7	8,7	41,3	57,8	0,0	-4,9	-299,4
139/13	26,7	20,3	8,6	8,6	38,9	57,3	0,0	-5,9	-340,9
140/14	27,1	20,3	8,5	8,5	37,6	56,6	0,0	-6,5	-358,2
141/15	27,4	20,4	8,5	8,5	36,9	56,4	0,0	-6,8	-369,2
142/16	27,4	20,5	8,4	8,4	36,5	55,3	0,0	-6,8	-362,5
143/17	26,8	20,6	8,5	8,5	38,3	55,4	0,0	-6,4	-320,7
144/18	26,0	20,8	8,6	8,6	40,6	55,4	0,0	-5,6	-267,9

Feststellungen:

- Der Verlauf der markanten Speichergrößen – wie beispielsweise Luftaustrittstemperatur und Leistung – korreliert außerordentlich stark mit der Größe Luftvolumenstrom.
- Bild 12.2 zeigt, dass das [Amplitudenverhältnis](#) – Amplitude der Luftaustrittstemperatur / Amplitude der Lufteintrittstemperatur – mit sinkendem Luftvolumenstrom abnimmt.

Im Gegensatz dazu wächst die [Phasenverschiebung](#). Die Zunahme steht im umgekehrten Verhältnis zum Luftvolumenstrom. Während in den ersten beiden Fällen (30000 m³/h und 15000 m³/h) die Zuordnung der Phasenverschiebung sofort erkennbar ist, wird im letzten Fall (3000 m³/h) die Phasenverschiebung aus Bild 12.1 gefolgert. Zusätzlich wurde aufbauend auf den

eingeschwungenen Zustand eine weitere Simulation durchgeführt, bei der das Maximum der Luft Eintrittstemperatur um weitere 5 K – quasi als Temperaturmarker – erhöht wurde. Die Reaktion in der Luftaustrittstemperatur war erst nach etwa 58 Stunden erkennbar.

Damit kann mit der Wahl des Luftvolumenstromes eine gute Zeitsteuerung für die Lieferung von erwärmter oder gekühlter Zuluft an den Verbraucher erfolgen.

- Mit der Größe des Luftvolumenstromes ist – wie aus Bild 12.3 ersichtlich – sehr eng auch die **Leistung** als Wärmeaufnahme bzw. Wärmeabgabe der Luft beim Durchströmen des Speichers verbunden.

Damit wird die bestehende Komplexität zwischen Phasenverschiebung, Temperaturamplitudendämpfung und Leistung deutlich.

- Soll beispielsweise lediglich eine **Frischlufthversorgung** für einen Raum mit möglichst konstanter Temperatur erfolgen, so wäre beispielsweise die dritte Variante – ein großer Speicher mit kleinem Luftvolumenstrom – geeignet.

Hat die **Lastkompensation** für einen Raum, der maßgeblich durch den Tagesgang der Außentemperatur und der Solarstrahlung belastet wird, Priorität, so ist z. B. der Einsatz der zweiten Variante – möglichst mit einer Phasenverschiebung von 12 Stunden – zu empfehlen.

- Interessant ist auch der im Bild 12.4 dargestellte Verlauf der **Temperaturen längs des Speichers** für Partikel 7 zu einer bestimmten Zeit (hier jeweils 3 Stunden vor Simulationsende).

Während bei der ersten Variante (30000 m³/h) noch eine Differenz zwischen der Luftaustrittstemperatur und der Schottertemperatur besteht (Speicher ist zu "kurz"), zeigt sich bei der zweiten Variante (15000 m³/h) eine Übereinstimmung der Luftaustrittstemperatur und der Schottertemperatur bereits vor dem Speicherende (Speicher ist zu "lang").

Bei der dritten Variante wird die Besonderheit offenbar, dass sich im Speicher mehrere Tagesgänge widerspiegeln. Ein Tagesgang umfasst in diesem Fall 41,5 Speicherabschnitte. In den 100 Speicherabschnitten passen somit $100 / 41,5 \text{ Tage} = 2,41 \text{ Tage}$. Dies entspricht einer Zeit von $2,41 \times 24 \text{ Stunden} \approx 58 \text{ Stunden}$. Dieser Wert stimmt wiederum mit der ermittelten Phasenverschiebung überein.

Anmerkung:

Der im Bild 12.4 für die letzte Variante gezeigte Verlauf der Schottertemperatur zeigt deutlich eine gedämpfte Schwingung, wie sie in bekannter Weise als Temperaturschwingung in einem Kontinuum auftritt. Im vorliegenden Modell haben die Partikel aber keinen Wärmeleitkontakt, sondern der Wärmetransport zwischen den Partikeln erfolgt nur konvektiv durch den Luftstrom.

Literatur

- [1] GLÜCK, B.: Wärmespeicher als mediendurchströmter Festkörper. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2006.
Bericht, Kurzbericht und Rechenprogramm kostenlos erhältlich unter:
<http://berndglueck.de/waermespeicher.php>
- [2] GLÜCK, B.: Schüttungskennzeichnende Merkmale von Schotterspeichern, F+E TGA 2007 (Interner Bericht)
- [3] STIEBER, R.: Luftdurchströmte Erdwärmespeicher mit Schotterschüttung, 1. Zwischenbericht, Westsächsische Hochschule Zwickau (FH) 2007 und
Materialeigenschaften und Eingabegrößen für die Simulation von Schotterspeichern. Heizung-Lüftung-Haustechnik (HLH). 2009, Heft 2, S. 24-29
- [4] VDI-Wärmeatlas, 2. bis 9. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994 bis 2002
- [5] GLÜCK, B.: Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1990
<http://www.berndglueck.de/Waermeuebertragung>
- [6] GLÜCK, B.: Zustands- und Stoffwerte (Wasser, Dampf, Luft), 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1991 (ISBN 3-345-00487-9)
<http://www.berndglueck.de/Stoffwerte>
- [7] GLÜCK, B.: Vergleichsprozesse der Klimatechnik. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1998 (ISBN 3-7880-7643-7)
<http://www.berndglueck.de/Klimaprozess>
- [8] GLÜCK, B.: Heizwassernetze für Wohn- und Industriegebiete. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1985 und Frankfurt /M: Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH 1985, ISBN 3-8022-0095-0
<http://www.berndglueck.de/Heizwassernetze>